

# **Lämpöpumpputekniikan hyödyntäminen lypsykarjatilalla**

Pekka Silvennoinen

Opinnäytetyö  
Syyskuu 2015

Energiatekniikan koulutusohjelma  
Tekniikan ja liikenteen ala



JYVÄSKYLÄN AMMATTIKORKEAKOULU  
JAMK UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Tekijä(t) Silvennoinen, Pekka	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 2.10.2015
	Sivumäärä 48	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty (x)
Työn nimi <b>Lämpöpumpputekniikan hyödyntäminen lypsykarjatilalla</b>		
Koulutusohjelma Energiatekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) Marjukka Nuutinen Matti Kurki		
Toimeksiantaja(t) Kurkelan Putkityö Oy		
<b>Tiivistelmä</b>  Opinnäytetyö tehtiin Kurkelan Putkityö Oy:n toimeksiantona. Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää lypsykarjatilalla syntyvän hukkalämmön hyödyntämistä lämpöpumpputekniikan avulla. Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää laskentaperusteisesti navetan kattoon asennettavan keruuputkiston lämmön talteenottokykyä ja tehokkuutta toimeksiantajan valitsemien komponenttien perusteella. Hukkalämmölle pohdittiin myös käyttökohteita. Työssä hukkalämmön käyttökohteeksi valittiin asuinrakennus, joka sijaitsee samassa pihapiirissä tuotantotilan kanssa.  Opinnäytetyön tietoperusta koottiin kirjallisuudesta sekä rakennusta koskevista määräyksistä. Raportissa esiteellään lämpöpumpputekniikkaa, komponentteja sekä yleisimmät lämpöpumppuratkaisut. Opinnäytetyössä esitellään lämmön siirtymistavat konvektio, konduktio ja säteily sekä niiden laskenta. Lisäksi työssä esitellään vaihtoehtoisen lämmöntalteenottotavan laskenta ja tulokset.  Opinnäytteen merkittävin tulos on navetan kattoon asennettavan lämmöntalteenottotavan tehokkuuden ja kannattavuuden laskenta. Tulosten perusteella tuotantotilan huoneilmasta saatavan lämmön talteenottaminen ei ole laskennassa olleella kattoon asennettavalla menetelmällä kannattavaa. Opinnäytetyössä kokonaistehokkaimmaksi ja kannattavuudeltaan parhaaksi valikoitui maalämpöratkaisu, jossa keruuputkisto asennetaan vaakatasoon maaperään. Jatkoselvityskohteiksi valittiin lanta-kouruihin ja lietalanta-altaisiin asennettavat lämmöntalteenottoputkistot. Tulosten luotettavuuden parantamiseksi tulisi tehdä pitkäaikaisia mittauksia sisälämpötilasta ja kosteudesta ympäri vuoden.		
Avainsanat (asiasanat) Lämpöpumppu, lämmöntalteenotto, maalämpö, hukkaenergia		
Muut tiedot		



Author(s) Silvennoinen, Pekka	Type of publication Bachelor's thesis	Date 2.10.2015
	Pages 48	Language Finnish
		Permission for web publication (x)
Title <b>Utilizing heat pump technology on a dairy cattle farm</b>		
Degree Programme Degree Programme in Energy Technology		
Tutor(s) Nuutinen, Marjukka Kurki, Matti		
Assigned by Kurkelan Putkityö Ltd		
<p>Abstract</p> <p>The thesis was made as an assignment for Kurkelan Putkityö Ltd. The main purpose of the thesis was to investigate utilizing the waste heat formed on a dairy cattle farm using heat pump technology. The aim of the thesis was to calculate the heat recovery ability and efficiency of a collecting pipeline installed on the roof of a barn based on the components chosen by the employer. Different applications using waste heat were also considered. In this thesis, the application chosen for the waste heat was a residence located in the same courtyard with the production facility.</p> <p>The background information of the thesis is based on literature as well as the regulations concerning building. In the thesis, heat pump technology, components and general heat pump solutions are introduced. Heat transfer modes convection, conduction and radiation as well as calculating them are presented in this thesis. Additionally, alternative means of heat recovery are presented in the thesis with calculations and results.</p> <p>The most significant outcome of the thesis are the calculations showing the efficiency and profitability of the alternative means of heat recovery. According to the results, heat recovery from the air in the production facility is not profitable using the alternative method. The geothermal heating solution where the collecting pipeline is installed horizontally in the ground was found most overall efficient and most profitable. Installing heat recovery pipelines in manure chutes and silt manure tanks were chosen as follow-up objectives. To improve the reliability of the results, long term measurements of the internal temperature and humidity should be made year-round.</p>		
Keywords Heat pump, heat recovery, geothermal heating, waste energy		
Miscellaneous		

## Sisältö

<b>1 Johdanto</b>	4
<b>2 Lämmöntalteenotto</b>	5
<b>3 Lämpöpumput</b>	8
3.1 Lämpöpumput historiasta nykypäivään	8
3.1.1 Ilmalämpöpumppu (ILP)	9
3.2 Maalämpöpumppu (MLP)	10
3.3 Ilma-vesilämpöpumppu (IVLP)	11
3.4 Poistoilmalämpöpumppu (PILP)	11
3.5 Lämpöpumpun toimintaperiaate	12
3.6 Kompressorit	13
3.7 Kompressoritekniikat	13
3.7.1 Mäntäkompressori	16
3.7.2 Ruuvikompressori	16
3.7.3 Scroll-kompressori	17
3.8 Lämpökerroin	19
3.9 Maalämpö	21
3.10 Maakylmä	24
<b>4 Lypsykarjatila</b>	24
4.1 Lämmönlähteet	24
4.2 Hukkalämmön käyttökohteet	27
<b>5 Keruupiirin lämmön talteenottokyvyn laskenta</b>	30
<b>6 Lämmöntuotantovaihtoehtojen vertailu</b>	35
<b>7 Tulosten pohdinta</b>	39
7.1 Tavoitteiden saavuttaminen ja luotettavuus	40
7.2 Jatkoselvitykset ja –toimenpiteet	41
<b>Lähteet</b>	43
<b>Liitteet</b>	46
Liite1. Muoviputken laskenta sähköverkkoanalogia	46
Liite 2. Kupariputken laskenta sähköverkkoanalogia	47
Liite 3. Laskentapohja	48

## Kuviot

Kuvio 1. Kuuman pinnan ja ilman välinen konvektio	6
Kuvio 2. Rakenteen konduktio	7
Kuvio 3. Lämpösäteily	8
Kuvio 4. Ilmalämpöpumpun havainnekuva	10
Kuvio 5. Poistoilmalämpöpumpun havainnekuva	11
Kuvio 6. Lämpöpumpun toimintaperiaate	12
Kuvio 7. Hermeettisen mäntäkompressorin havainnollistava poikkileikkauskuva	14
Kuvio 8. Ruuvikompressorin havaintokuva	15
Kuvio 9. Avokompressorin havainnekuva	15
Kuvio 10. Puolihermeettisen mäntäkompressorin havainnekuva	16

Kuvio 11. Hermeettisen ruuvikompressorin havainnollistava poikkileikkaus kuva .....	17
Kuvio 12. Scroll-kompressorin puristusprosessin havainnekuva .....	18
Kuvio 13. Hermeettisen scroll-kompressorin havainnekuva .....	19
Kuvio 14 Lämpökaivoon liitettävän maalämmön havainnekuva .....	21
Kuvio 15 Vaakaputkistona asennettavan maalämpöpumpun keruupiirin havainnekuva .....	22
Kuvio 16. Vesistöön asennettavan keruupiirin havainnekuva .....	23
Kuvio 17. Pohjaveteen asennettavan keruupiirin havainnekuva.....	23
Kuvio 18. Lisälämmöntarpeen mitoitusta varten vaadittu aluejako.....	28
Kuvio 19. Lämmönsiirron tehokkuusvertailu muovi- ja kupariputkella.....	33
Kuvio 20. Keruupiirien kustannusarviot .....	36
Kuvio 21. Takaisinmaksuajat keruupiiriratkaisuille .....	37
Kuvio 22. Investoinnin säästöarvio 15 vuodessa .....	38

## Taulukot

Taulukko 1. Erieläinlajien alimmat ja ylimmät kriittiset sekä optimilämpötilat .....	26
Taulukko 2. Kotieläinten lämmön- ja kosteudentuotanto sekä niille suositeltavat huoneilman talvenaikaiset arvot lämpöeristetyissä kotieläinrakennuksissa .....	27
Taulukko 3. Korjaus- ja aluekertoimet .....	28
Taulukko 4. Laskennassa käytetyt lähtötiedot.....	32
Taulukko 5. Keruupiirin ympäristön lämmönjohtavuudet.....	34
Taulukko 6. Keruupiirien aktiiviset pituudet .....	35
Taulukko 7. Asuinrakennuksen lähtötiedot. ....	36
Taulukko 8. Asuinrakennuksen lämmitysmuotojen energiakustannukset vuoden 2015 kustannustason mukaan .....	39

## Käsitteet

<b>COP</b>	(Coefficient of performance) Hetkellinen lämpökerroin kuvaa lämpöpumpun tuottaman ja kuluttaman energian suhdetta tietyllä hetkellä tietyissä olosuhteissa.
<b>SCOP</b>	(Season Coefficient of performance) Vuosilämpökerroin, lämpökertoimen arvo koko lämmityskaudelle.
<b>MUT</b>	(Mitoittavat ulkolämpötilat) Rakennuksen lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmien mitoituksessa käytettävät mitoittavat ulkoilman lämpötilat on jaettu neljään eri vyöhykkeeseen.
<b>Fluidi</b>	Yleisnimitys väliaineille, joissa rakenneosat pääsevät liikkumaan vapaasti toistensa suhteen.
<b>Lämmönjohtavuus</b>	Se miten hyvin jokin materiaali tai aine johtaa lämpöä. Yksikkö (W/m*K).
<b>Ominaislämpökapasiteetti</b>	Jonkun materiaalin tai aineen kyky varastoida lämpöä tilavuutta kohden. Yksikkö kJ/(m <sup>3</sup> *K)

# 1 Johdanto

Opinnäytetyön päätavoitteena oli tutkia tuotantotilassa kattoon asennettavan lämpöpumpun keruuputkiston tehokkuutta ja kannattavuutta. Tarkastelussa keruuputkisto asennettaisiin tuotantotilassa katon rajaan, jossa on huomattava määrä lämpöenergiaa, joka jää hyödyntämättä. Putkistoratkaisun oletettiin olevan edullisin ja helppoasenteinen verrattuna vaaka- ja pystyasenteiseen keruuputkistoon. Talteen saatavan hukkalämmön käyttökohteeksi valittiin asuinrakennus. Tuotantotilana oli lypsykarjanavetta. Lämmöntalteenottoa tuotantotilan katosta vertailtiin muihin mahdollisiin asuinrakennuksen lämmitysvaihtoehtoihin. Vertailuun otettiin lämpöpumpputkistot sekä sähkö- ja öljylämmitys. Toimeksiantajalla oli tämä uusi idea toteuttaa lämmöntalteenotto kohteissa, joissa sen hyödyntäminen on vähäistä, jopa olematonta matalaenergisen hukkalämmön takia. Tulevaisuudessa kasvavien energiakustannusten takia on tärkeää kehittää matalaenergisen hukkalämmön talteenottoa ja pyrkiä käyttämään hyödyksi nykyisin hyödyntämättömät hukkaenergiat tehokkaammin.

Työ suoritettiin toimeksiantajan valitsemien komponenttien perusteella ja laskettiin kattoon asennettavan lämmöntalteenottotavan tehokkuutta. Työssä tarkasteltiin yleisimpiä lämmöntalteenottotapoja ja niiden toteutusta. Laskennassa tarkasteltiin lämmönjohtumista ilmasta muoviputkesta toteutettavaan keruupiiriin, jossa virtaa vesi-etanoliseos. Muoviputkistoa vertailtiin lisäksi kupariputkistoon, jonka lämmönjohtavuus on huomattavasti parempi kuin muovin. Saatuihin tuloksiin perustuen tarkasteltiin lämmönkäyttökohteita lypsykarjatiloihin. Järjestelmästä tehtiin kustannusarvio, jonka perusteella laskettiin takaisinmaksuaika, jota verrattiin muihin vaihtoehtoihin lämmöntuotantomuotoihin. Tarkastelussa etsittiin kustannustehokkainta tapaa toteuttaa lämmöntalteenotto.

## 2 Lämmöntalteenotto

Lämpöenergia siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta alempaan lämpötilaan päin. Jos lämpötilaeroa ei ole, lämmönsiirtyminen loppuu. Siirtymiseen vaikuttavia tekijöitä ovat väliaine, materiaali ja lämmönlähde. Lämpö siirtyy kolmella eri tavalla; kulkemalla (konvektio), johtumalla (konduktio) ja säteilemällä. (Çengel & Ghajar 2011.)

Konvektiota on kahden erityyppistä. Luonnollinen konvektio on lämmönsiirtoa nesteestä tai kaasussa lämpötilojen aiheuttamien tiheyserojen muodostamien virtausten mukana. Toinen konvektion muoto on pakotettu konvektio, joka on lämpötekniikassa tärkeämpi ja tehokkaampi muoto siirtää energiaa. Pakotetussa konvektiossa aineen virtaus saadaan aikaiseksi pumppujen ja puhaltimien avulla. (Mt.)

Lämmöntalteenotossa hyödynnetään näitä kaikkia lämmönsiirtymistapoja. Vaikka lämmönsiirtyminen voidaan jakaa kolmeen eri muotoon, tapahtuu lämmönsiirtymisen yleensä kaikkien mekanismien yhteisvaikutuksesta. (Mt.)

Konvektion laskennassa käytetään kaavaa 1.

Konvektio kuvaa liikkuvan fluidin ja kiinteän pinnan välistä lämmönsiirtoa.

$$\dot{Q}_{conv} = h * A * (T_s - T_{\infty}) \quad (1)$$

missä

$\dot{Q}_{conv}$  on konvektion lämmönsiirtoteho, W

$h$  on konvektion lämmönsiirtokeroin,  $\frac{W}{m^2 * K}$

$A$  on pinnan pinta-ala,  $m^2$

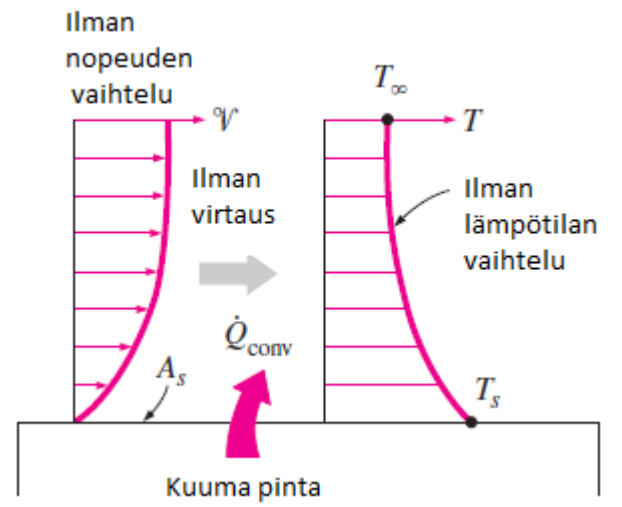
$T_s$  on pinnan lämpötila, K tai °C

$T_{\infty}$  on fluidin lämpötila kaukana pinnasta, K tai °C

(Çengel & Boles 2011, 93.)



Kuviossa 1 on havainnollistettu kaavan 1 konvektion laskentaa ilman ja kuuman pinnan välillä.



Kuvio 1. Kuuman pinnan ja ilman välinen konvektio (muokattu: Çengel & Ghajar 2011, 28.)

Johtumalla eli konduktiolla tapahtuva lämmönsiirron teho lasketaan kaavalla 2.

$$\dot{Q}_{cond} = k * A * \frac{T_1 - T_2}{\Delta_x} \quad (2)$$

missä

$\dot{Q}_{cond}$  on johtumisen lämmönsiirtoteho, W

$k$  on materiaalin johtumiskerroin,  $\frac{W}{m \cdot K}$

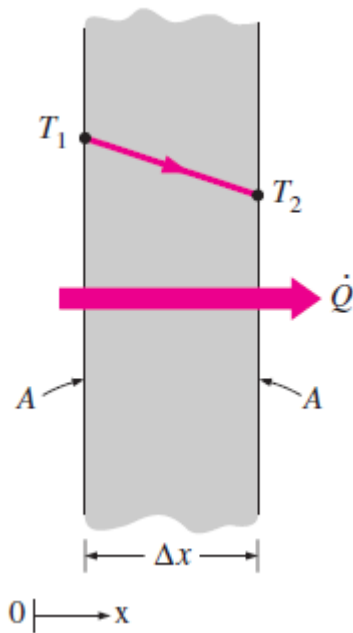
$A$  on väliaineen pinta-ala,  $m^2$

$T_1$  on korkeampi lämpötila, K tai °C

$T_2$  on matalampi lämpötila, K tai °C

$\Delta_x$  on väliaineen paksuus, m

Kuviossa 2 on havainnollistettu johtumista eli konduktiota.



Kuvio 2. Rakenteen konduktio (Çengel & Ghajar 2011, 18.)

Materiaalien johtumiskerroin  $k$  saa yleensä suurimman arvonsa kiinteillä ja pienimmän arvonsa kaasumaisilla olomuodoilla. Muutokset ovat yhteydessä lämmönjohtavuuteen sekä ominaislämpöön. (Çengel & Ghajar 2011, 20.)

Lämpösäteily on johtumisen muoto, joka ei vaadi väliainetta kuten johtuminen ja konvektio. Lämpöenergia siirtyy elektromagneettisina aaltolina. Siirtyvän lämpösäteilyn teho voidaan laskea kaavalla 3.

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon * \sigma * A_s * (T_s^4 - T_{surr}^4) \quad (3)$$

missä

$\dot{Q}_{rad}$  on lämpösäteilyn teho, W

$\varepsilon$  on kappaleen emissiivisyyskerroin, 0-1

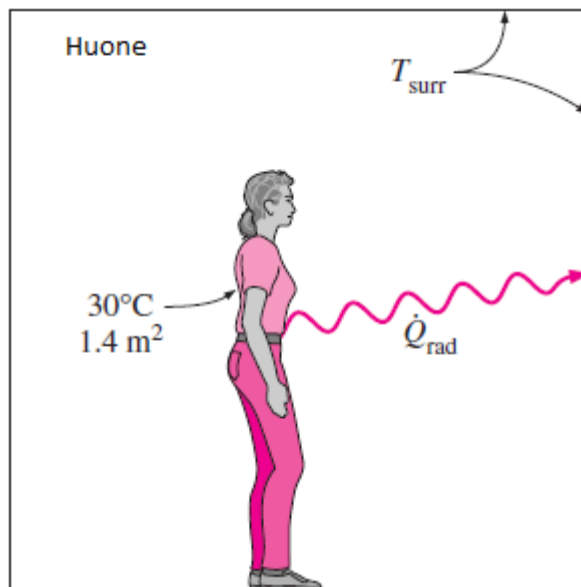
$\sigma$  on Stefan Boltzmanin vakio,  $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$

$A_s$  on kappaleen pinnan pinta-ala,  $m^2$

$T_s$  on pinnan lämpötila, K

$T_{surr}$  on ympäristön tai ympäröivän pinnan lämpötila, K  
(Çengel & Boles, 2011, 95.)

Kuviossa 3 on havainnollistettu, kuinka ihmisen lämpösäteily absorboituu huoneen seiniin. Säteilyn teho saadaan laskettua kaavalla 3.



Kuvio 3. Lämpösäteily (muokattu: Çengel & Ghajar 2011, 29.)

### 3 Lämpöpumput

#### 3.1 Lämpöpumput historiasta nykypäivään

Lämpöpumppujen toiminta perustuu Sadi Carnot'n vuonna 1824 esittelemään termodynaamiseen kiertoprosessiin. Tämän kiertoprosessin pohjalta lämpöpumpun toimintaperiaatteen vain muutaman vuoden päästä esitteli englantilainen fyysikko William Thomson. Ensimmäisen kerran keksinnöille löytyi laajamittaisempaa käyttöä Sveitsissä toisesta maailmansodasta johtuneen hiilipulan vuoksi. Rakennuksiin läm-

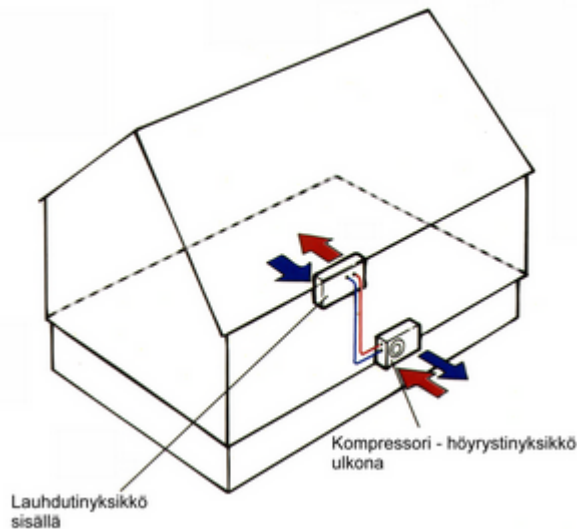
pöpumppuja alettiin asentaa 1920-luvulla. Laajempi kiinnostus lämpöpumppuja kohtaan on syntynyt vasta öljyn ja muiden energiamuotojen hintojen noustua voimakkaasti. (Perälä & Perälä 2013, 27–28.)

Lämpöpumppu jossakin muodossa löytyy nykyisin jo lähes jokaisesta kotitaloudesta. Lämpöpumpun toimintaperiaate on sama kuin jääkaapissa ja pakastimessa eli se kerää sekä siirtää lämpöä kylmemmästä paikasta lämpimämpään. Lämpöpumpun toiminta perustuu lämpötilaeroihin. Lämpöpumput on jaoteltu niiden lämmönkeräystavan mukaisesti eri tyyppeihin. (Mts. 27-28.)

Lämpöpumppujen myyntimäärät ovat Suomessa olleet jatkuvassa kasvussa. Kotitaloudet ovat investoineet lämpöpumppuihin. Selitys siihen on investoinnin kannattavuus, kun siirrytään sähkö- tai öljylämmityksestä tuottamaan asunnon lämmitysenergia lämpöpumpulla. Myös ilmastonmuutos on kannustanut kotitalouksia siirtymään ilmastoystävällisempään lämmöntuotantomuotoon. Lämpöpumpulla 2/3 lämmitysenergiasta saadaan uusiutuvista energianlähteistä. (Lämpöpumput 2015.)

### **3.1.1 Ilmalämpöpumppu (ILP)**

Ilmalämpöpumppu kerää lämmön ulkoilmasta ja luovuttaa lämmön rakennuksen sisäilmaan. Erittäin yksinkertainen ja edullinen ratkaisu voidaan asentaa jälkikäteen lähes kaikkiin kohteisiin. (Perälä & Perälä 2013, 32.) Ilmalämpöpumpun ulkoyksikkö asennetaan rakennuksen ulkopuolelle, kuten kuviossa 4 havainnollistetaan. Ilmalämpöpumppu on vaihtoehto, kun ei haluta porata tai kaivaa keruupiiriä maaperään. Ympäristön kannalta lähes huomaamattoman ulkoyksikön voi halutessaan verhoilla. On kuitenkin otettava huomioon, ettei verhoamalla estetä ilman vapaata liikettä yksikölle.



Kuvio 4. Ilmalämpöpumpun havainnekuva (Ilmalämpöpumppu (ILP) n. d.)

### 3.2 Maalämpöpumppu (MLP)

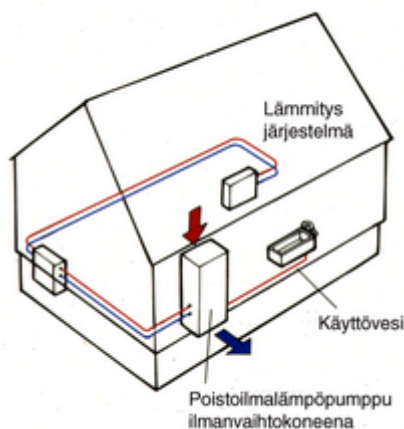
Maalämpöpumpulla lämpö kerätään maaperästä tai vesistöistä putkistolla keruupiirissä kiertävään nesteeseen, ja neste luovuttaa lämmön rakennuksen vesikiertoiseen järjestelmään, jossa lämmönkeruu sekä luovutus ovat tehokasta. Parhaan hyödyn saavuttamiseksi ratkaisu vaatii lattialämmityksen, sillä kun lämpöpumpulla tuotetaan lämpöä patterilämmitysjärjestelmän vaatimaan korkeampaan lämpötilaan, laskee lämpöpumpun hyötysuhde merkittävästi. Ratkaisussa on myös mahdollisuus patterilämmitykseen mutta heikommalla hyötysuhteella. (Perälä & Perälä 2013, 32.) Lämmitysjärjestelmän tehokkuuteen vaikuttaa merkittävästi lämmitettävän sisäilman lämpötila. Patterijärjestelmässä lämmönsiirtopinta-ala on pieni verrattuna lattialämmitykseen, joten lämpötilaeron tulee olla huomattavasti suurempi kuin lattialämmityksessä saman tehon saavuttamiseksi lämmityksessä. Maalämpöpumppuratkaisu mahdollistaa myös viilennyksen tarvittaessa kesäaikaan.

### 3.3 Ilma-vesilämpöpumppu (IVLP)

Ilma-vesilämpöpumpulla lämpö kerätään ulkoilmasta kuten ilmalämpöpumpulla, paitsi lämpö luovutetaan sisäilman sijasta veteen, mikä mahdollistaa lämpimän käyttöveden valmistuksen. Ratkaisu on käytännöllinen, jos alueella ei ole mahdollista kaivaa eikä porata mutta kohteessa on vesikiertoinen lämmitysjärjestelmä.

### 3.4 Poistoilmalämpöpumppu (PILP)

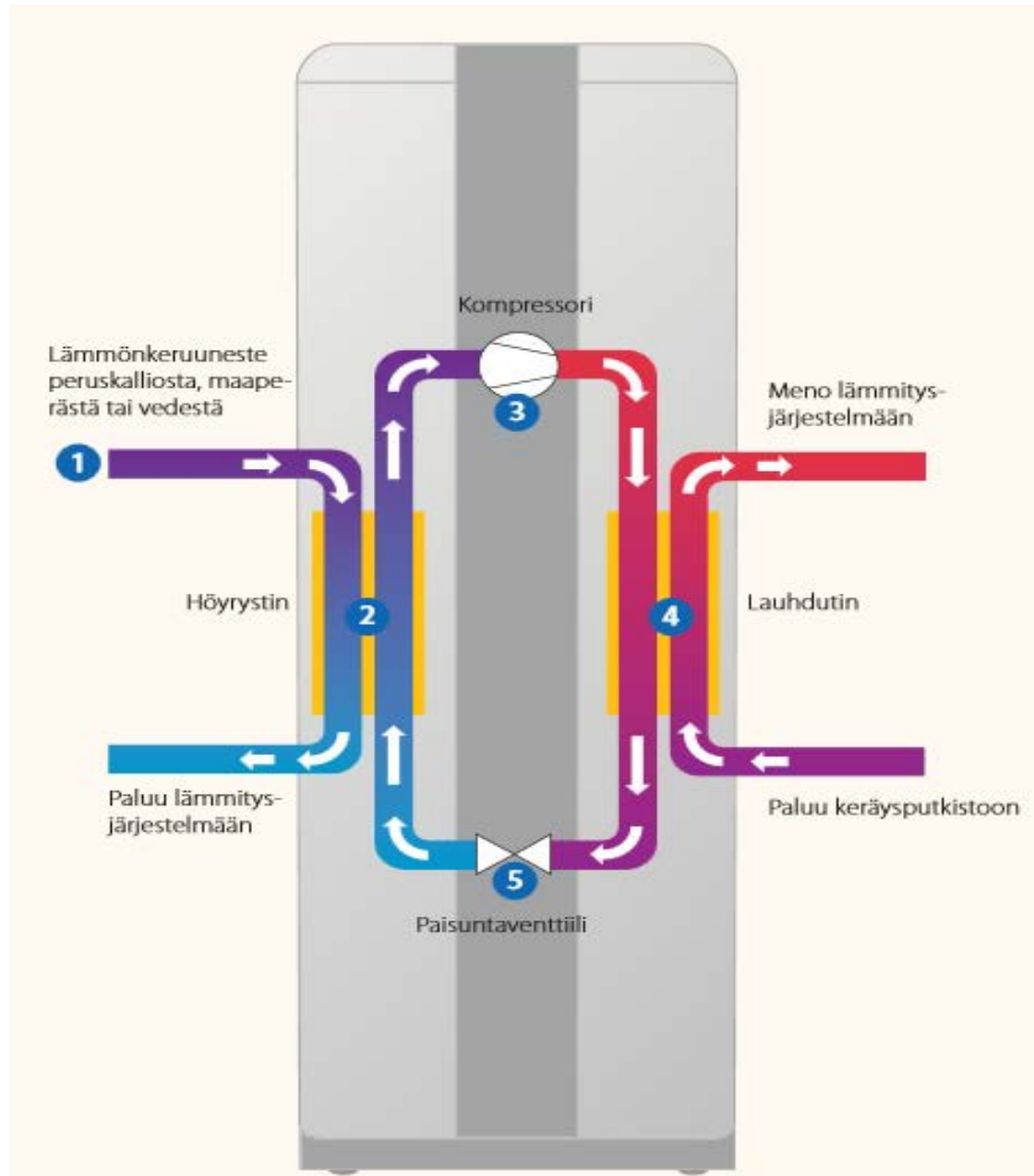
Poistoilmalämpöpumpulla lämpö kerätään rakennuksen poistoilmasta ja luovutetaan tuloilmaan tai vaihtoehtoisesti vesikiertoon. Tyypistä riippuen mahdollisuus on myös lämpimän käyttöveden valmistukseen. Kuviossa 5 on havainnollistettu poistoilmalämpöpumpun kytkentää asennuskohteessa. (Perälä & Perälä 2013, 32.) Poistoilmalämpöpumppu on hyvä vaihtoehto kun halutaan parantaa esimerkiksi kerrostalon energiatehokkuutta. Suurissa kiinteistöissä ilmanvaihto on suurempaa joten ilman mukana poistuva lämpöenergia on merkittävä osa kiinteistön lämmityskustannuksista. Poistoilmalämpöpumpulla poistoilmasta saadaan talteen lämpöenergiaa, joka palautetaan kiinteistön lämmitykseen.



Kuvio 5. Poistoilmalämpöpumpun havainnekuva (Poistoilmalämpöpumppu (PILP) n.d.)

### 3.5 Lämpöpumpun toimintaperiaate

Lämpöpumpun toiminta perustuu kylmäainekiertoon putkilla toisiinsa yhdistetyissä osissa, kuten kuviossa 6 on havainnollistettu.



Kuvio 6. Lämpöpumpun toimintaperiaate (Danfoss lämpöpumput pientaloille 2013, 7)

Paisuntaventtiililtä höyrystimeen alhaiseen paineeseen vapautuva kylmäaine jäähtyy ja alkaa sitoa lämpöä ympäristöstä, jolloin kylmäaine alkaa kaasuuntumaan. Kompressorit puristaa kylmäaineen korkeaan paineeseen, minkä seurauksena lämpötila nousee lähes 100 asteeseen celsiusta. Lauhduttimessa kuuma korkeapaineinen kylmäaine luovuttaa keräämänsä lämmön lämmitysjärjestelmään ja lauhtuessaan se tiivistyy takaisin nesteeksi. Paisuntaventtiilistä nestemäinen, lämpöenergiansa luovuttanut paineistettu kylmäaine purkautuu paisuntaventtiilin läpi takaisin höyrystimeen. Samalla kylmäaineen paine alenee ja se jäähtyy alle -20 asteeseen celsiusta. Kylmäaine alkaa uudelleen sitomaan lämpöä ja kierto jatkuu. (Perälä & Perälä 2013, 28.)

### **3.6 Kompressorit**

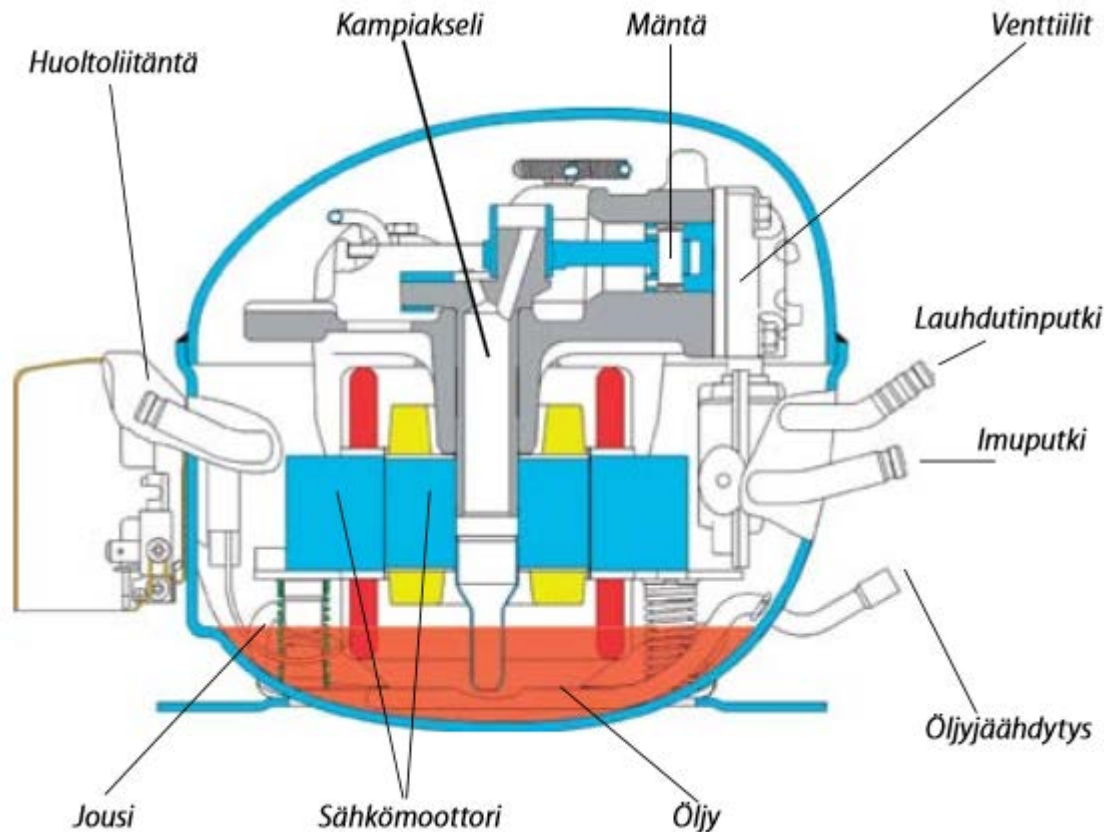
Kompressoria voidaan kutsua lämpöpumpun sydämeksi, sillä sen tekemä työ mahdollistaa lämpöenergian siirtymisen. Lämpöpumppujen kompressoreja pyörittää yleensä oikosulkumoottori sen luotettavuuden ja vähäisen huoltotarpeen takia. (Perälä & Perälä 2013, 41–42.)

Kompressorin tehtävä on korottaa kylmäaineen paine ja lämpötila höyrystymislämpötilasta lauhtumislämpötilaan. Kompressorin aikaansaaman paine-eron johdosta kylmäaine siirtyy paisuntaventtiilin kautta lauhduttimesta höyrystimeen. (Kaappola, Hirvelä, Jokela & Kianta 2011, 51.) Kompressorit voidaan jaotella rakenteen mukaan hermeettisiin, puolihermeettisiin ja avokompressoreihin.

### **3.7 Kompressoritekniikat**

Hermeettisessä kompressorissa sekä sähkömoottori että kompressorit ovat tiiviiksi hitsatun suojakuoren sisällä. Kuviossa 7 on hermeettisen mäntäkompressorin poikkileikkauskuva, josta on nähtävissä kompressorin osat sekä rakenne, jossa kompressorit ja sähkömoottori ovat jousien varassa. Jousien tehtävä on vaimentaa mäntäkompressorin männän edestakaisen liikkeen aiheuttamat värinät.

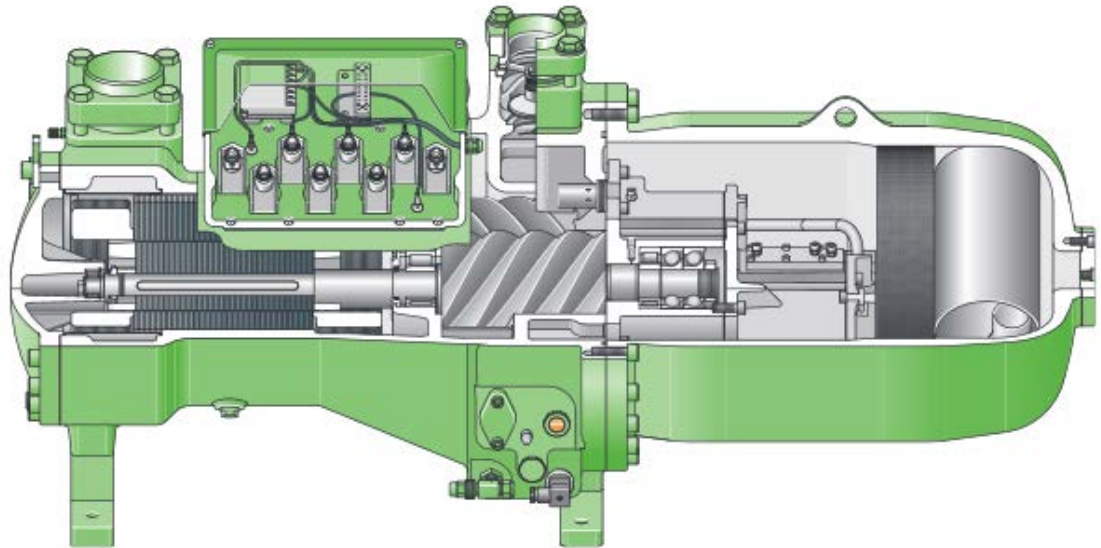




Kuvio 7. Hermeettisen mäntäkompressorin havainnollistava poikkileikkauskuva (Kylmäinfo 2009)

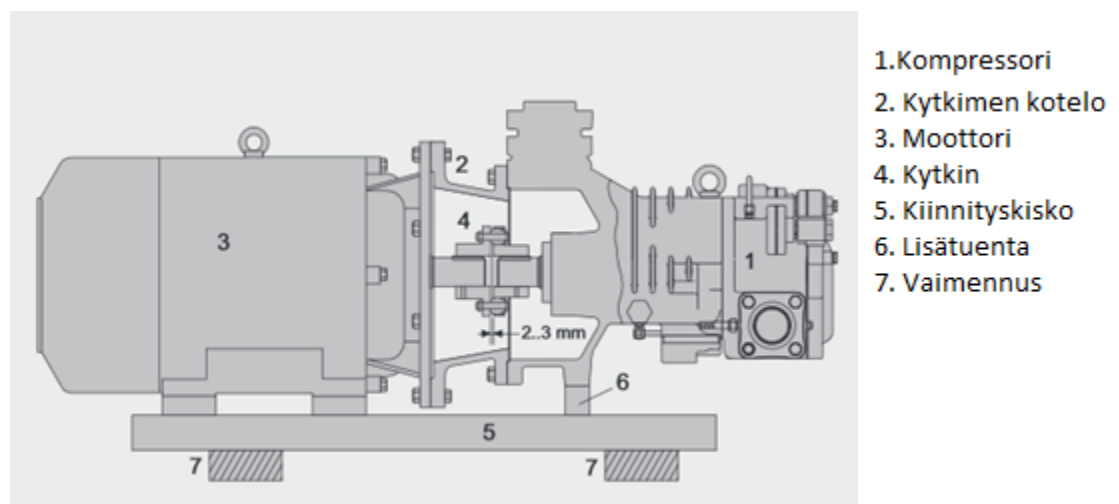
Hermeettisten kompressorien yleisimpiä käyttökohteita ovat jää- ja pakastinkaapit, pienet kylmälaitteet ja kylmätilat, ilmastoinnin ja veden jäähdytyskoneet sekä lämpöpumput. Hermeettisen kompressorin hajotessa usein korjaaminen on mahdotonta, joten se vaihdetaan uuteen. (Kaappola ym. 2011, 51–54.)

Puolihermeettisessä kompressorissa moottori ja kompressor ovat avattavan suoja-kuoren sisällä, kuten kuviossa 8 oleva ruuvikompressor. Puolihermeettinen rakenne mahdollistaa kompressorin ja moottorin korjauksen tarvittaessa. Puolihermeettisiä kompressoreja käytetään yleisesti kaupan kylmäkoneissa sekä ilmastoinnin- ja vedenjäähdytyskoneistoissa.



Kuvio 8. Ruuvikompressorin havaintokuva (Compact screw compressors n.d.)

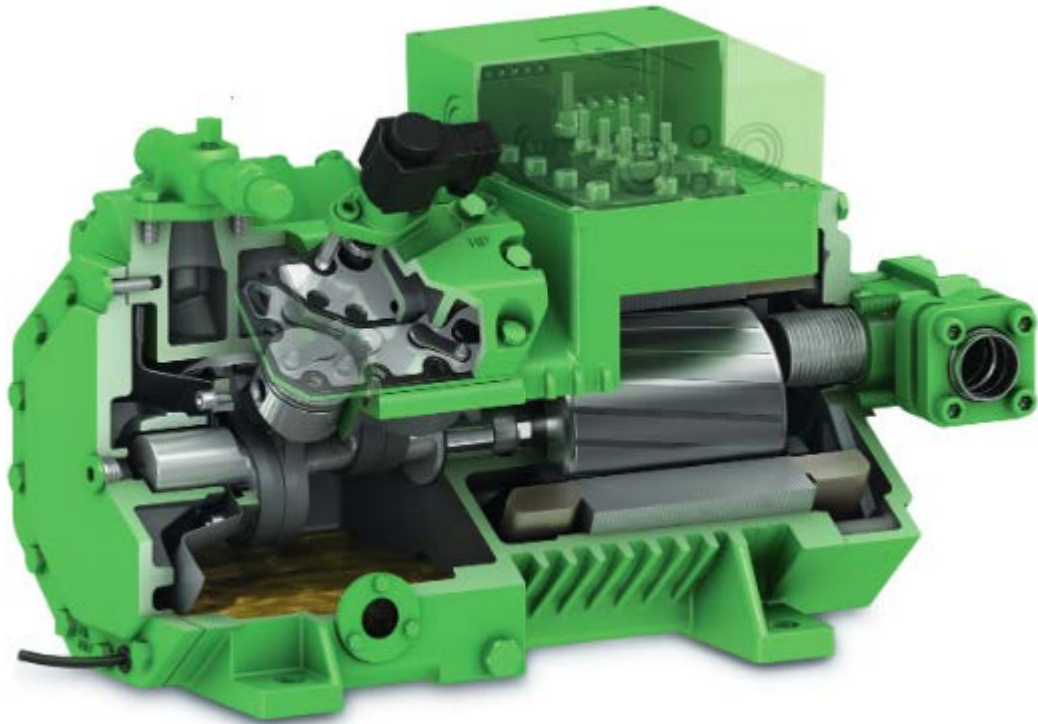
Avokompressoreissa käyttövoima tuodaan kompressorin akselille suojakuoren läpi. Voima voidaan siirtää avokompressorin akselikytkimellä tai hihnavälityksellä. Kuviossa 9 on esitetty avokompressorin akselikytkimellä toteutettuna. Avokompressoreita käytetään yleisimmin ajoneuvojen ilmastoinnin kompressoreina sekä teollisuuden kylmäkoneissa. (Kaappola ym. 2011, 53.)



Kuvio 9. Avokompressorin havainnekuva (Betriebsanleitung operating instructions n.d., muokattu, 6)

### 3.7.1 Mäntäkompressor

Mäntäkompressorin perustyyppitoiminta muistuttaa polttomoottoria. Edestakaisin sylinterissä liikkuva mäntä puristaa kylmäaineen pienempään tilavuuteen. Mäntäkompressor on harvemmin käytössä lämpöpumpuissa. Yleisimmin mäntäkompressoria käytetään jäähdytyskoneissa ja jääkaapeissa. (Perälä & Perälä 2013, 41.) Kuviossa 10 on havainnollistava kuva puolihermeettisestä mäntäkompressorista.



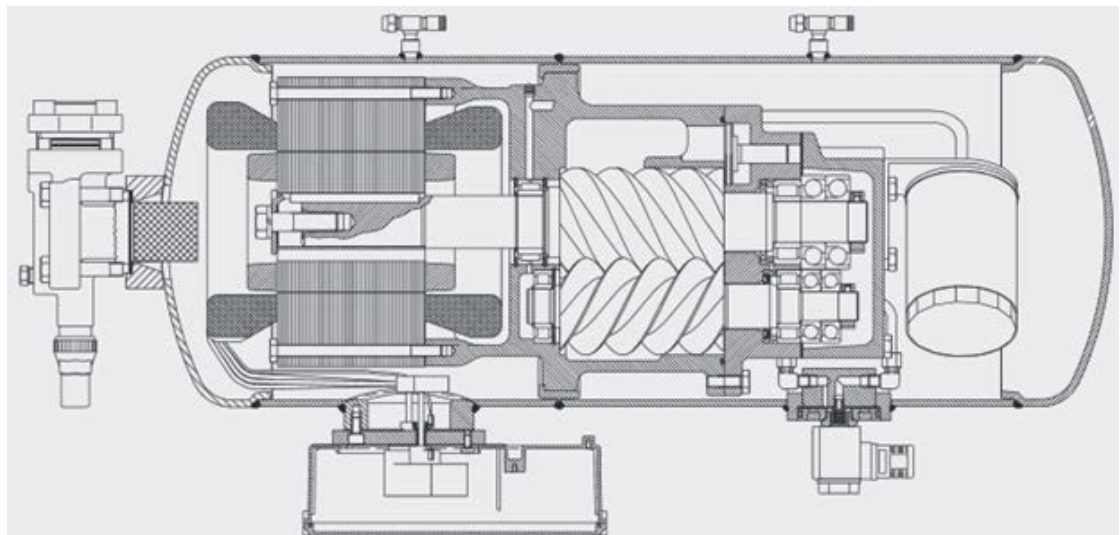
Kuvio 10. Puolihermeettisen mäntäkompressorin havainnekuva (Reciprocating compressors n.d., 4)

### 3.7.2 Ruuvikompressor

Ruuvikompressorissa on usein kaksi vastakkaisiin suuntiin pyörivää spiraalimaista ruuvia. Myös yksiruuvisia kompressoreita on markkinoilla. Ruuvi(e)n pyöriessä ruuvi(e)n ja kompressorinkuoren väliin jäävä tila muodostaa puristustilan, joka liikkuu

kompressorin päästä toiseen samalla pienentyen kohti poistoporttia. Jäähdytyskäytössä olevissa kompressoreissa on voitelu usein järjestetty öljyruiskutuksella. Öljy toimii samalla tiivisteinä ruuvien ja kompressorin kuoren välissä, mikä sallii epätarkemman työstön sekä vähentäen aiheutuvaa melua. Öljyllä on myös jäähdyttävä vaikutus, joten puristuksen loppulämpötila laskee.

Ruuvikompressorit ovat rakenteeltaan yksinkertaisia ja luotettavia. Rakenne on esitetty kuviossa 11. Etuina voidaan mainita myös niiden tehonsäädön yksinkertaisuus. (Aittomäki 1992.)

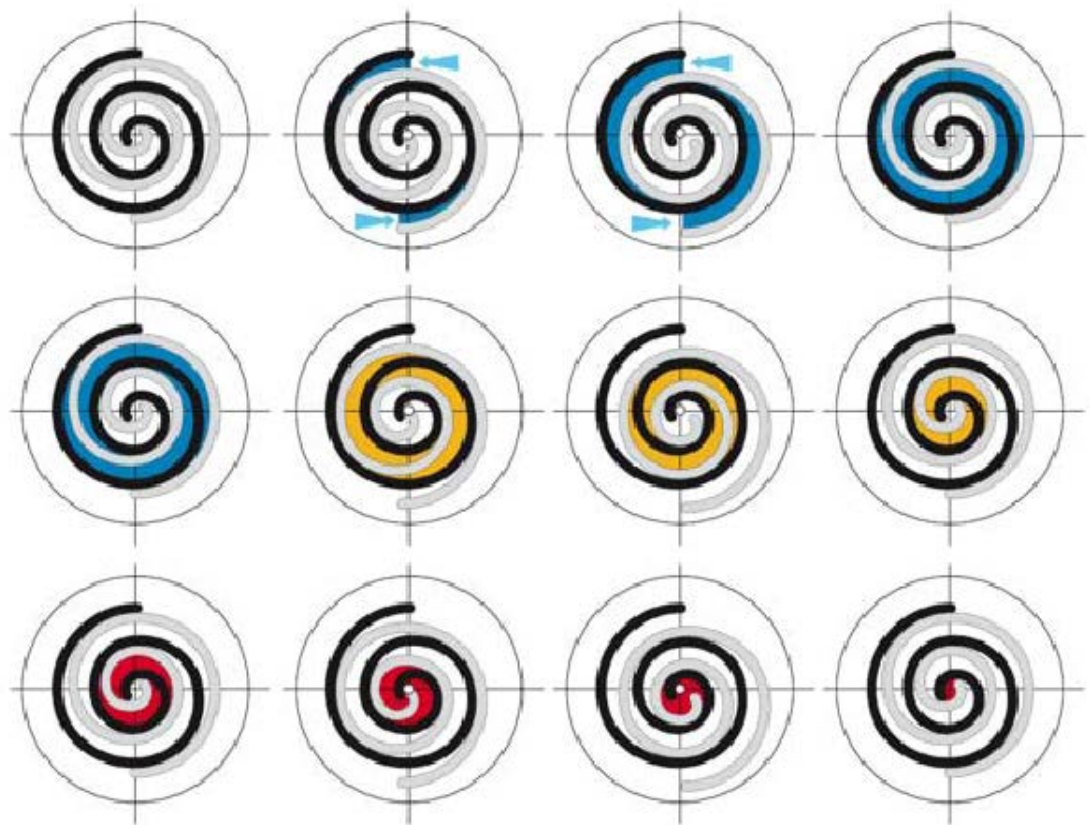


Kuvio 11. Hermeettisen ruuvikompressorin havainnollistava poikkileikkaus kuva (Hermetic Compact screw compressors n.d., 2)

### 3.7.3 Scroll-kompressor

Lämpöpumpuissa yleisimmin käytetty scroll-kompressor eli kierukkakompressor on rakenteeltaan yksinkertainen. Kompressorissa on vähän liikkuvia osia, joten se on luotettava. Mäntäkompressorin verrattuna scroll-kompressor on hiljaisempi venttiilittömän rakenteen vuoksi ja scroll-kompressor on teoriassa hyötysuhteeltaan n. 10

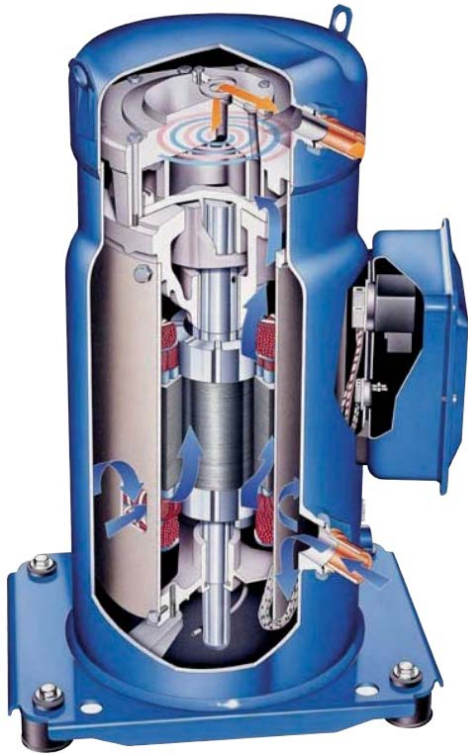
% parempi kuin mäntäkompressor. Scroll-kompressorissa kylmäaineen puristus on toteutettu kahdella kierukalla, jotka ovat tiiviisti kosketuksissa toisiinsa. Toinen kierukoista on asennettu kiinteästi paikoilleen, eikä toinenkaan kierukka varsinaisesti tee pyörivää liikettä vaan liikkuu hieman kääntymättä lainkaan. Kuviossa 12 musta kierukka kuvaa paikallaan pysyvää osaa ja harmaa kierukka oikosulkumootorilla liikkuva. Kuviossa 12 on havainnollistettu, kuinka kylmäaine puristuu kierukoiden välissä pienempään tilavuuteen ja korkeaan paineeseen kohti scroll-kompressorin keskiötä, josta puristettu kylmäainekaasu purkautuu lauhduttimeen. (Perälä & Perälä 2013.)



Kuvio 12. Scroll-kompressorin puristusprosessin havainnekuva (Kylmäsovellusten scroll-kompressorit n.d., 3)

Scroll-kompressorit valmistetaan yleensä hermeettisiksi, kuten kuviossa 13 oleva kompressor, jossa kompressor ja sähkömoottori ovat molemmat tiiviiksi hitsatun suojakuoren sisällä.





Kuvio 13. Hermeettisen scroll-kompressorin havainnekuva (Performer scroll compressors n.d., 5)

### 3.8 Lämpökerroin

Lämpökerrointa COP (Coefficient Of Performance) käytetään kuvaamaan lämpöpumpun tehokkuutta. Se kertoo lämpöpumpun annetun teoreettisen lämmöntuoton ja laitteiston tarvitseman energian suhteen.

Lämpöpumpun tehokkuudesta kertova lämpökerroin,  $\varphi$ , määritetään seuraavasti kaavalla 4.

$$\varphi = \frac{Q}{W} \quad (4)$$

missä

$\varphi$  on saatava lämpökerroin

$Q$  on prosessista saatu lämpöenergia, J

$W$  on lämpöenergian saavuttamiseksi tehty työ, J

Häviöttömän tapauksen laskennassa (Carnot- prosessi) käytetään kaavaa 5.

$$\varphi = \varepsilon + 1 \quad (5)$$

Suurin Carnot- koneella saatavissa oleva  $\varepsilon$  ja  $\varphi$  voidaan laskea kaavoilla 6 ja 7.

$$\varepsilon = \frac{T_0}{T-T_0} \quad (6)$$

$$\varphi = \frac{T}{T-T_0} \quad (7)$$

joissa

$T_0$  on matalin prosessissa esiintyvä lämpötila, K

$T$  on korkein prosessissa esiintyvä lämpötila, K

(Kaappola ym. 2011, 231.)

Seuraavassa on esimerkki lämpötila eron vaikutuksesta COPiin eräällä kompressorilla.

- -5/+55 (lämpötilaero 60 astetta) COP 2,6
- -5/+35 (lämpötilaero 40 astetta) COP 4,0
- +15/+35 (lämpötilaero 20 astetta) COP 6,0

(Seuna S. 2011)

### 3.9 Maalämpö

Maalämpö on maa- ja kallioperän pintaosiin auringon säteilystä peräisin olevaa lämpöenergiaa. Syvemmällä kallioperässä oleva geoterminen energia on pääosin radioaktiivisten aineiden hajoamisesta peräisin olevaa lämpöenergiaa. Suomessa maa- ja kallioperän pintaosien lämpötila on keskimäärin kaksi astetta vuotuista ilman keskilämpötilaa korkeampi, ja se vaihtelee maantieteellisen sijainnin mukaan. Paikalliset vaihtelut voivat olla suuria. Rakennetuilla alueilla pintakerrosten lämpötila on useita asteita suurempi kuin luonnontilaisessa metsässä. Maan pintaosien lämpötila vakiintuu Etelä-Suomessa n. 5–6 asteeseen celsiusta 14–15 metrin syvyydessä. Syvemmälle kallioperään mentäessä geoterminen energia nostaa lämpötilaa 0,5–1 astetta celsiusta/100 m. Suomen eteläosissa kallioperän lämpötila on 300 metrin syvyydessä noin 6,5–9 astetta celsiusta. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 7.)

Maalämmöntalteenotossa lämpöpumpun keruupiiri kerää lämpöä. Lämmönkeruuputkisto voidaan asentaa joko vaakatasossa pintamaahan vähintään yhden metrin syvyyteen kaivetulla usean sadan metrin pituisella muoviputkella tai pystysuoraan kallioon porattuun lämpökaivoon, kuten kuviossa 14 on havainnollistettu. Maanalaisessa piirissä putkistoon siirtyy lämpöä routarajan alapuolelta sulasta maasta ympäri vuoden.



Kuvio 14 Lämpökaivoon liitettävän maalämmön havainnekuva (Neljälämmönlähdettä n.d.)

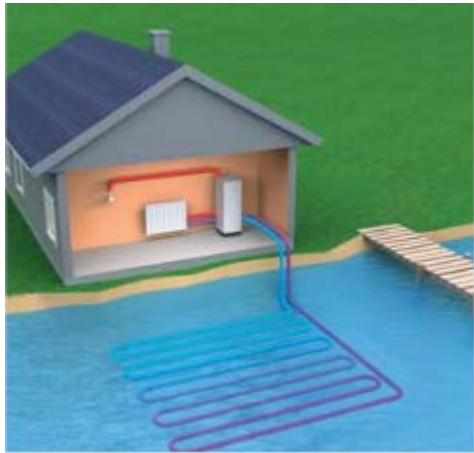


Kalliolämmöntalteenotossa keruupiiri kerää lämpöä syvältä kalliosta, jossa lämpötila pysyy lähes vakiona ympäri vuoden. Pystyputkisto lasketaan halkaisijaltaan 10–15 cm:n porareikään, jonka syvyys on jopa 300 m. Pystyputkistosta saatava energiamäärä on vaakaputkistoon nähden suurempi käytettyä putkimetriä kohden. Asennuskustannuksiltaan pystyputkisto on huomattavasti kalliimpi kuin vaakaputkisto. Pystyputkiston tekeminen on usein ainut vaihtoehto tiheästi asutulla alueella, jossa vaakaputkistolle (ks. kuvio 15) ei ole tilaa. (Maalämpöpumppu 2014.)



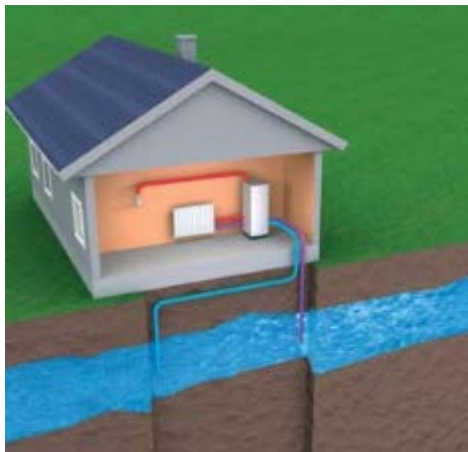
Kuvio 15 Vaakaputkistona asennettavan maalämpöpumpun keruupiirin havainnekuva (Danfoss lämpöpumput pientaloille 2013, 6).

Vaihtoehtona on myös tehdä keruuputkisto vesistöön (ks. kuvio 16). Vesistöstä saatava lämpö on tasainen ympäri vuoden, mikäli putkisto saadaan asennettua riittävän syvälle. Veden tiheys on suurimmillaan noin 4 celsiusasteen lämpötilassa, joten pohjasta saatava lämpö on lähes vakio.



Kuvio 16. Vesistöön asennettavan keruupiirin havainnekuva (Danfoss lämpöpumput pientaloille 2013, 6)

Markkinoilla on myös vaihtoehtona asentaa keruuputkisto keräämään lämpöä pohjavedestä (ks. kuvio 17). Pohjavesi on lämpötilaltaan tasainen ympäri vuoden.



Kuvio 17. Pohjaveteen asennettavan keruupiirin havainnekuva (Danfoss lämpöpumput pientaloille 2013, 6)

### 3.10 Maakylmä

Maalämpölaitteistolla on mahdollista lämmittää ja myös viilentää kesäaikana. Kesäaikana ylimääräinen lämpökuorma voidaan johtaa keruupiiriin, joka viilentää kiertonesteeseen. Piiristä palaava viileämpi kiertoneste voidaan esimerkiksi johtaa jäädytyspatteriin jäähdyttämään kiinteistön tuloilmaa. Vaihtoehtoisesti voidaan myös kierrättää jäähtynyttä kiertonestettä lattialämmityksen erillisen lämmönvaihtimen kautta, näin saadaan jäähdytettyä tiloja tehokkaasti. Patteriverkostolla tilojen jäähdytys on mahdollista, mutta patterien pintaan mahdollisesti tiivistyvä kosteus tulee ottaa huomioon. (Perälä & Perälä 2013.)

Näillä tavoin toteutetussa jäähdytyksessä vain kiertovesipumppu ja mahdolliset puhaltimet kuluttavat sähköenergiaa. Jäähdytykseen kuluu näin ollen huomattavasti vähemmän sähköenergiaa kuin esimerkiksi ilmalämpöpumpulla jossa lämpöenergia siirretään ulkoilmaan kompressorin avulla. Lisäksi voidaan saada pientä hyötyä lämmityskaudelle maaperään varastoituneesta lämpöenergiasta. (Perälä & Perälä 2013.) Kesäaikana maaperässä kierrätetyn lämpimämmän kiertonesteen luovuttama lämpöenergia varastoituu maaperään ja nostaa maaperän lämpötilaa. Tästä voidaan saada hyötyä lämmityskaudella.

## 4 Lypsykarjatila

### 4.1 Lämmönlähteet

Lypsykarjatiloiilla syntyy ylimääräistä lämpöä monissa prosesseissa, eläinten luovuttamaa lämpöä tuotantotilaan sekä lannan mukana lantakouruihin. Tässä opinnäytetyössä keskityttiin eläinten luovuttaman lämmön talteenottoon. Talteen saatavalle lämmölle pohdittiin käyttökohteita, uuden ajattelutavan mukaista lämmöntalteenottojärjestelmää sekä laskettiin sen kannattavuutta.

Maatalouden tuotantorakennusten lämpöhuollosta ja huoneilmastosta on annettu määräykset ja suositukset maa- ja metsätalousministeriön määräyksissä ja ohjeissa C2.2. (Maatalouden tuotantorakennukset lämpöhuolto ja huoneilmasto C2.2 n.d..)

*Maatilakiinteistöjen lämmityksessä on pyrittävä uusiutuvien energialähteiden ja ensisijaisesti tilan omien polttoaineiden käyttöön. Lämmitysjärjestelmissä on pyrittävä taloudellisiin, tekniikaltaan yksinkertaisiin ja käyttövarmoihin ratkaisuihin.*

*Maatalouden kotieläin- ja muiden tuotantorakennusten ilmanvaihto- ja lämmityslaitteiden suunnittelussa on otettava huomioon soveltuvin osin Suomen rakentamismääräyskokoelman D-osan ohjeet.*

*Terveystieteiden tutkimuskeskuksissa sekä maa- ja metsätalousministeriön päätöksissä annettuja säännöksiä tulee noudattaa. Asuinrakennusten lämpöhuoltoa ja huoneilmastoa käsitellään erikseen maa- ja metsätalousministeriön rakentamisohjeessa MMM-RMO C2.1. (Maatalouden tuotantorakennukset lämpöhuolto ja huoneilmasto C2.2. n.d..)*

Eläinsuojan vuorokautinen lämpötilanvaihtelu tuotantokyvyn kannalta tulisi pitää viittä celsiusastetta pienempänä. Alhaisissa lämpötiloissa eläin käyttää suuremman osan energiastaan ruumiinlämmön ylläpitämiseen ja rehuyksikköä kohden saatava tuotanto heikkenee. Tällöin puhutaan alemmasta kriittisestä lämpötilasta. Liian korkeissa lämpötiloissa eläimen ruokahalu heikkenee ja sen myötä tuottavuus heikkenee. Tällöin puhutaan ylemmästä kriittisestä lämpötilasta. (Maatalouden tuotantorakennukset lämpöhuolto ja huoneilmasto C2.2 n.d..)

Eri eläinlajien kriittiset sekä optimilämpötilat ovat esitettynä taulukossa 1.

Taulukko 1. Erieläinlajien alimmat ja ylimmät kriittiset sekä optimilämpötilat (Maatalouden tuotantorakennukset lämpöhuolto ja huoneilmasto C2.2 n.d., 1)

Eläinlaji	kriittiset lämpötilat °C		
	alempi	ylempi	Optimi
Lehmä	(-25...)-15	23...27	5...15
Nuorkarja	(-15...) 0	25...30	10...20
Pikku vasikka	( 0...) 10	30	15...25
Lihakarja, > 3kk	(-35...)-15	25...30	-10...15
Porsiva emakko	( 5...) 20	27...32	10...28
Vastasyntynyt porsas, ≤ 2 viikkoa	25	34	30...32
Lihasika	( 7...) 15	25...27	15...22

Lypsylehmien lämmön- ja kosteudentuotanto sekä niille suositeltavat huoneilman talviaikaiset arvot on esitetty taulukossa 2.

Kokemusperäisesti tiedetään, että tuotantorakennuksen lämpötila ei pysy aina optimilämpötilassa 12 astetta celsiusta vaan vaihtelee. Tuotantorakennuksen sisälämpötilaan vaikuttaa moni tekijä: eläinten määrä, rakennustapa ja ilmanvaihdon toteutus ovat merkittäviä tekijöitä sisäilman lämpötilaan.

Taulukko 2. Kotieläinten lämmön- ja kosteudentuotanto sekä niille suositeltavat huoneilman talvenaikaiset arvot lämpöeristetyissä kotieläinrakennuksissa. (Maatalouden tuotantorakennukset lämpöhuolto ja huoneilmasto C2.2 n.d., 3)

Eläin	Paino kg	Eläinten ikä, Kk (vrk)	Suositus- lämpötila °C	Suht. Kost:n max-%	Lämmön- luovutus W/el.	Kosteuden luovutus g/h	Ilmanvaihto m <sup>3</sup> /h min. max.
Lypsylehmä	400..500		12	85	700	400	55 310
- " -	600		12	85	800	450	65 330
- " -	700		12	85	850	500	70 360
Hieho ja ummessa oleva lehmä	500		12	85	600	400	50 240
Nuorkarja, uudistus	400	18	12	85	500	300	40 200
- " -	300	9	12	85	400	250	30 150
- " -	150	5	12	85	250	150	20 100
Vasikka	75	2	12	85	100	75	10 55
Lihakarja	600	20	12	80	600	750	110 250
- " -	500	16	12	80	550	500	80 230
- " -	300	10	12	80	400	450	55 180
- " -	200	6	12	80	350	350	50 150
- " -	100	3	12	80	250	200	30 100
Emakko + pikkuporsaat, (7kpl)	200+10x7		16(32)	80	550	450	35 250
Joutilas emakko	200		12	80	350	100	20 150
Karju	200	12	12	80	350	100	20 150
Nuoremakko, uudist.	<200	<3	16	80	150	75	20 150
Pikkuporsas	20	3	20	80	60	60	5 30
- " -	10	1	22	80	30	40	3 30
Tuotannossa oleva emakko (Kaikki eläimet samassa tilassa - emakot, pikkuporsaat, karjut)			16	80	480	220	35 260
Lihotussika, jatkuva tuotanto	30...110	3...7	16	80	110	100	10 70
Lihotussika, kierroskasvatus	110	5...7	16	80	200	150	15 100
- " -	90	3...5	16	80	150	120	13 80
- " -	60	2...3	16	80	100	90	10 60
- " -	30	1...2	18	80	75	70	7 40
Kana	2	>5	18	70	10	5	0.5 6.0
Broileri	1.7	35 vrk	21	75	10	5	0.8 5.0
- " -	1.0	25 vrk	23	75	10	5	0.5 3.0
- " -	0.5	16 vrk	27	75	5	2.5	0.3 2.5
- " -	0.1	5 vrk	31	75	1	1	0.1 0.5
- " -	0.05	1 vrk	34	70			
Lammas	<100	>2	10	80	150	80	10 50
- " -	10	<2	10	80	50	20	2 15
Hevonen (työ)	500		10	80	650	200	30 240
- " - (kilpa)	500		14	80	650	220	35 350

Suurin sallittu ilman virtausnopeus eläinten oleskelu vyöhykkeellä talven aikana on 0.25 m/s.  
Lämpimänä vuodenaikana sallitaan suurempi virtausnopeus.

## 4.2 Hukkalämmön käyttökohteet

Saatavan lämmön käyttökohteiksi soveltuvien maatalan huoltorakennusten, konesuo-  
jien sekä yritystoimintaan liittyvien tuotantorakennusten lämmitystehon tarve ja  
vuotuinen lämmönkulutus voidaan määrittää karkeasti maa- ja metsätalousministe-  
riön rakentamismääräykset ja -ohjeiden liitteestä 10 esitetyllä kaavalla. (Maatalou-  
den tuotantorakennusten lämpöhuolto ja huoneilmasto C2.2. n.d..) Kaavoissa käyte-  
tyt korjauskertoimet löytyvät taulukosta 3.

Laskennassa käytettävä aluejako ilmenee kuviosta 18.



Kuvio 18. Lisälämmöntarpeen mitoitusta varten vaadittu aluejako (Maatalouden tuotantorakennukset lämpöhuolto ja huoneilmasto C2.2 n.d., 5)

Lämpötehotarpeen mitoituksessa ja energiankulutuslaskennassa kartasta kuviosta 18 katsotaan, mihin alueeseen kohde kuuluu ja sen mukaan valitaan korjauskerroin taulukosta 3.

Taulukko 3. Korjaus- ja aluekertoimet (Maatilan lämpöhuolto, asuinrakennusten lämmitys ja ilmanvaihto C2.1 n.d., 2)

Korj.kerroin	ALUE I	ALUE II	ALUE III	ALUE IV
C <sub>1</sub>	1.0	1.1	1.2	1.3
C <sub>2</sub>	1.0	1.1	1.3	1.6
Kaksikerroksisessa käytetään kerrointa • 0.75				

Lämpötehtäjäntarve lasketaan kaavalla 8.

$$P = C_1 * 0,03 * A_1 * h \quad (8)$$

missä

P on lämpötehtäjäntarve, kW

C<sub>1</sub> on korjauskerroin taulukosta 1

A<sub>1</sub> on lämmitetty pohjapinta-ala, m<sup>2</sup>

H on huonekorkeus, m

Vuotuinen lämmönkulutus lasketaan kaavalla 9.

$$Q = C_2 * 40 * A_1 * h \quad (9)$$

missä

Q on vuotuinen lämmönkulutus, kWh

C<sub>2</sub> on korjauskerroin taulukosta 1

A<sub>1</sub> on lämmitetty pohjapinta-ala, m<sup>2</sup>

h on huonekorkeus, m

(Maatalouden tuotantorakennukset lämpöhuolto ja huoneilmasto C2.2  
n.d., 6.)

Lämmön käyttökohteiksi soveltuvat eläinten rehunsulatus, eläinten juomaveden lämmitys, osastojen pesuun käytettävän lämpimän veden lämmitys, tilasäiliöiden sekä lypsypuikistojen pesu sekä lypsypuikistojen ja asemien pesuvesien lämmitys.



## 5 Keruupiirin lämmön talteenottokyvyn laskenta

Opinnäytetyössä laskettiin lämmöntalteenottokyky vaihtoehtoiselle keruupiirin asennustavalle, jossa keruupiirin putkisto toteutettaisiin vesijohtoputkella navetan kattoon. Tarkastelussa navetan sisäilman lämpötilaksi valittiin taulukosta 2 12 astetta celsiusta, joka on suositus lypsylehmälle sisälämpötilaksi. Laskennassa apuna on käytetty EES-ohjelmistoa, josta saatujen tulosten perusteella tehtiin sähköverkkoanalogiin perustuva lämmönsiirtolaskenta, joka esitettynä kaavoissa 10–13. Sähköverkkoanalogi-laskenta muovi- ja kupariputkelle ovat liitteissä 1 ja 2. EES-ohjelmisto on insinööreille suunnattu ohjelmisto yhtälöiden ratkaisuun.

Laskenta aloitettiin etsimällä kirjallisuudesta, taulukoista sekä EES-ohjelmistoa apuna käyttäen tarvittavat fluidintiheys ( $\rho$ ), fluidin dynaaminen viskositeetti ( $\mu$ ), fluidin keskimääräinen nopeus ( $v$ ) ja Prandtin luku ( $Pr$ ). Näitä arvoja käyttäen laskettiin Reynoldsin luvut putkivirtaukselle ja ilmavirtaukselle putken yli. Niiden perusteella tiedettiin onko virtaus laminaarinen vai turbulентtinen. Virtauksen tyypin selvityksen jälkeen ratkaistiin Nusseltin luku, josta saatiin ratkaistua  $h$  johtamalla kaavasta 10.

$$Nu = \frac{h \cdot L_c}{k} \quad (10)$$

jossa

$Nu$  on Nusseltin luku

$h$  on konvektion lämmönsiirtokerroin,  $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

$L_c$  on karakterisistinen pituus, m

$k$  on fluidin johtumiskerroin,  $\frac{W}{m \cdot K}$

Konvektion aiheuttama lämpövastus ulko- ja sisäpinnoille laskettiin kaavalla 11.

$$R_{conv} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (11)$$

jossa

$h$  on konvektion lämmönsiirtokerroin,  $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

$A$  on pinnan pinta-ala,  $m^2$

Konduktion aiheuttama lämpövastus laskettiin kaavalla 12.

$$R_{cyl} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k} \quad (12)$$

jossa

$\ln$  on luonnollinen logaritmi

$r_2$  on sylinterin ulomman pinnan säde, m

$r_1$  on sylinterin sisemmän pinnan säde, m

$L$  on sylinterin pituus, m

$k$  on materiaalin johtumiskerroin,  $\frac{W}{m \cdot K}$

Kokonaislämpövastus laskettiin kaavalla 13.

$$R_{total} = R_{conv,1} + R_{cyl} + R_{conv,2} \quad (13)$$

jossa

$R_{total}$  on kokonaislämpövastus, °C/W

$R_{conv,1}$  on konvektion lämpövastus ulkopinnalla, °C/W

$R_{cyl}$  on konduktion lämpövastus sylinterirakenteelle, °C/W

$R_{conv,2}$  on konvektion lämpövastus sisäpinnalla, °C/W

(Çengel & Ghajar 2011, 150-153.)

Lämpötehon määrittämisessä käytettiin kaavaa 14.

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{total}} \quad (14)$$

jossa

$\dot{Q}$  on siirtyvä lämpöteho, W

$T_{\infty 1}$  on ulomman fluidin lämpötila, K

$T_{\infty 2}$  on sisemmän fluidin lämpötila, K

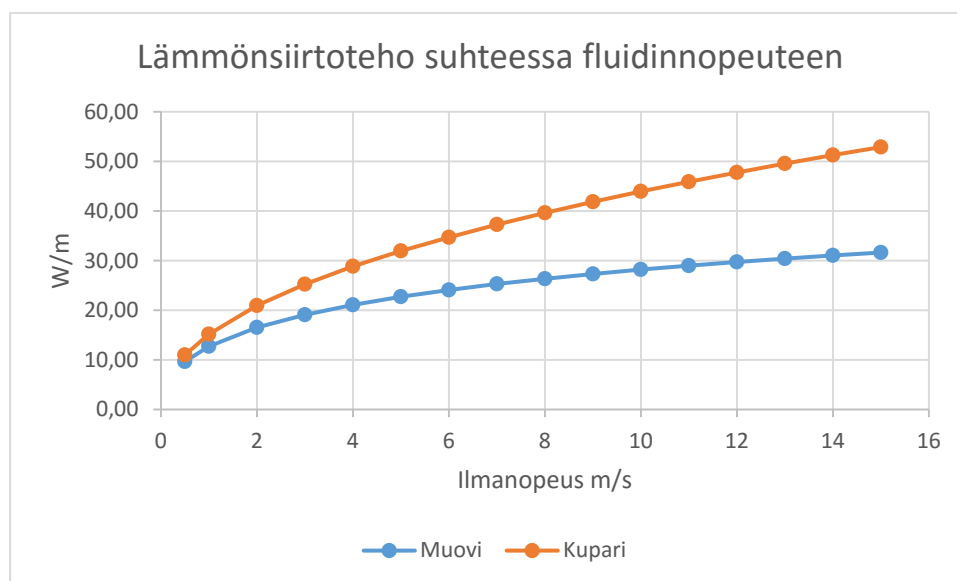
$R_{total}$  on kokonaislämpövastus, °C/W

Laskennassa käytetyt komponentit ja niiden lähtötiedot on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Laskennassa käytetyt lähtötiedot (Naturet -17 -keruunesteen tiedot käyttöturvallisuustiedote n.d.)

<b>Keruupiirin putkisto</b> (PEM Muoviputki 40.3.7 PN10)		Yksikkö
D ulkohalkaisija	40	mm
Seinämäpaksuus	3,7	mm
Lämmönjohtavuus	0,32	W/m*K
<b>Keruuneste (Naturet -17)</b>		
Ominaislämpökapasiteetti	3,69144	kJ/kg*K
K arvo	0,45	W/m*K
Dynaaminen viskositeetti	0,001535	kg/m*s

Sisäilmaston olosuhteiden perusteella keskimääräiseksi lämpötilaeroksi keruupiirissä laskettiin noin 8 astetta celsiusta ja ilman liikkeeksi oletettiin 1 m/s. Tulokseksi laskennassa kattoon asennettavalle keruupiirille saatiin 12,7 W/m. Putkiston ulkopinta-ala metriä kohden laskennassa käytetyllä muoviputkella on 0,126 m<sup>2</sup>/m. Lämmön siirtotehoksi näillä arvoilla saatiin 101,3 W/m<sup>2</sup>, joka on suhteellisen heikko tulos. Tämä johtuu ilman heikosta kyvystä siirtää lämpöenergiaa. Ilman konvektiivinen lämmönsiirto on heikko ja keruupiirin materiaaliksi valittu muoviputki on lämmönjohtavuudeltaan heikko verrattuna kupariputkeen, jonka K on vastaavasti 401 W/m\*K (Çengel & Ghajar 2011, 20). Kuviossa 19 on vertailtu lämmönsiirron tehokkuutta samoilla mitoilla toteutetun muovi- ja kupariputken välillä suhteessa fluidin nopeuteen, tässä tapauksessa ilman nopeutta keruupiirin putkiston yli. Sisäpuolella virtaavan keruunesteen konvektiivinen lämmönsiirto on tehokasta virtauksen muodostuessa täysin turbulenttiseksi, mikä tehostaa pakotettua konvektiota.



Kuvio 19. Lämmönsiirron tehokkuusvertailu muovi- ja kupariputkella

Kuviosta 19 voi havaita, että vaikka ilman nopeutta nostettaisiin, ei lämmönsiirron tehokkuus parane muoviputkella merkittävästi, koska muovi on hyvä eriste. Vastaavasti kupariputkella lämmönsiirron tehokkuus kasvaa suhteessa nopeasti eikä sen lämmönjohtavuus kuvaajassa näyttäisi välillä 0,5–15 m/s vielä muodostuvan rajoittavaksi

tekijäksi. Laskennan yhteydessä laadittiin laskentapohja helpottamaan uudelleen laskentaa, tämä laskentapohja liitteessä 3.

Keruupiirin asennuspaikkaan vaikuttavimpana tekijänä on ympäröivän aineen johtavuus. Johtavuudet on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Keruupiirin ympäristön lämmönjohtavuudet (Geoenergia-Tutkimushanke n.d. ; Valtanen 2010.)

Graniitti	2,2-3,5	W/m*K
Kalkkikivi	2,2	W/m*K
Hiekkakivi	1,6-2,1	W/m*K
Savi (kuiva)	1,1	W/m*K
Savi (märkä)	1,7	W/m*K
Hiekka (kuiva)	0,76	W/m*K
Hiekka (märkä)	2,5	W/m*K
Ilma	0,026	W/m*K
Vesi	0,59	W/m*K

Keruupiirien aktiiviset pituudet on esitetty taulukossa 6. Kohteessa vaakatasoon asennettavalle keruuputkiston asennuspaikka olisi peltomaata joka on asennussyvytydessä märkää savea. Pystysuoraan asennettavan porakaivon saisi porattua peruskallioon, jonka arvioitu johtavuus on 3,0 W/m\*K. Poistoilmaratkaisussa ilmamääräksi laskettiin nykyisen poistoilmakanavan virtaus jonka määräksi saatiin 1 041,7 l/s.

Taulukko 6. Keruupiirien aktiiviset pituudet

Keruupiirin asennustapa	Aktiivisen putkiston pituus
Maaputkisto	668m
Porakaivo	192m
Kattoon asennettu	630m

## 6 Lämmöntuotantovaihtoehtojen vertailu

Eri lämmöntuotantovaihtoehtoja vertailtiin niiden kustannusten ja kokonaistalouden näkökulmasta. Vertailuun valittiin kolme eri mahdollista lämmitysmuotoa: sähkö, öljy sekä lämpöpumppu. Sähkölämmityksen hyötysuhde on 100 % ja investointikustannukset 0 euroa, koska kohteessa jo olemassa oleva sähkölämmitysjärjestelmä. Öljylämmitysjärjestelmän hyötysuhteeksi lämmöntuotannossa on arvioitu 85 % kuviossa 21. Öljylämmitysjärjestelmän uusimisen on arvioitu maksavan 5000 euroa asennuskustannuksineen. Vertailussa sähkön hinnaksi otettiin Savon Voima Oyj:n sähkön hinta 6,13€/kWh, johon lisättiin siirtomaksu 3,42€/kWh ja sähkövero 2,79€/kWh (Savon Voima 2015). Öljyn hinnaksi vertailuun otettiin Neste markkinointi Oy:n laskurilla kotiin toimitetun polttoöljyn hinta 0,78224 €/l (Neste 2015).

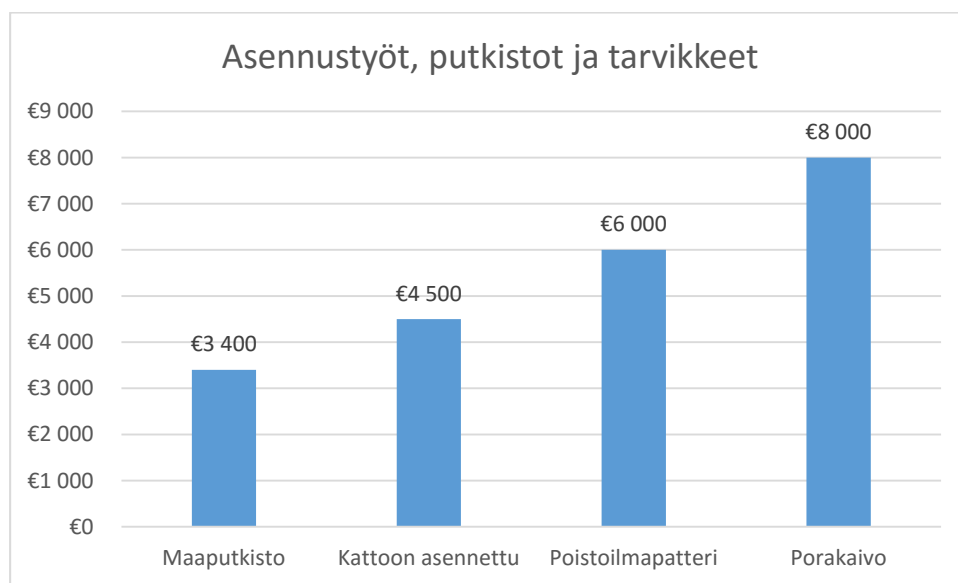
Kaikissa lämpöpumppuratkaisuissa on laskennassa käytetty samaa lämpöpumppua, joten vertailu ottaa huomioon vain keruuputkistovaihtoehtojen väliset kustannuserot. Lämpöpumpun hinta-arvioksi saatiin asennustarvikkeineen 16900 € (Roponen 2015). Kohteeksi hukkalämmön hyödyntämiselle valittiin asuinrakennus, jonka lähtötiedot esitettynä taulukossa 7.

Taulukko 7. Asuinrakennuksen lähtötiedot.

<b>Rakennus</b>		
Lämmitettävä pinta-ala	150	m <sup>2</sup>
Sisälämpötila	21	°C
Mitoitusulkolämpötila	-32	°C
Menoveden lämpötila MUT:lla	55	°C
Paluuveden lämpötila MUT:lla	47	°C
Ominaistehon tarve	55	W/m <sup>2</sup>
<b>Rakennuksen energiantarve</b>		
Lämmitys	20590	kWh/a
Lämminkäyttövesi	9400	kWh/a
Yhteensä	29990	kWh/a

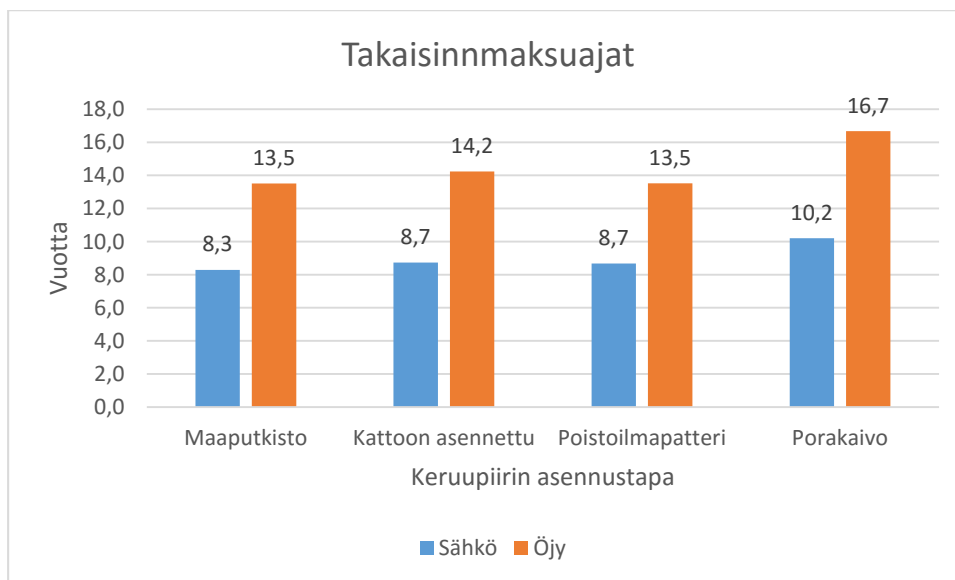
Asuinrakennuksessa on vesikiertoinen patterilämmitysjärjestelmä. Nykytilanteessa lämmityksen vaatima energia tuotetaan öljyllä, kulutus noin 3550 litraa vuodessa.

Kustannusarviot mahdollisten lämpöpumpun lämmönkeruupiirien osalta on esitetty kuviossa 20.



Kuvio 20. Keruupiirien kustannusarviot

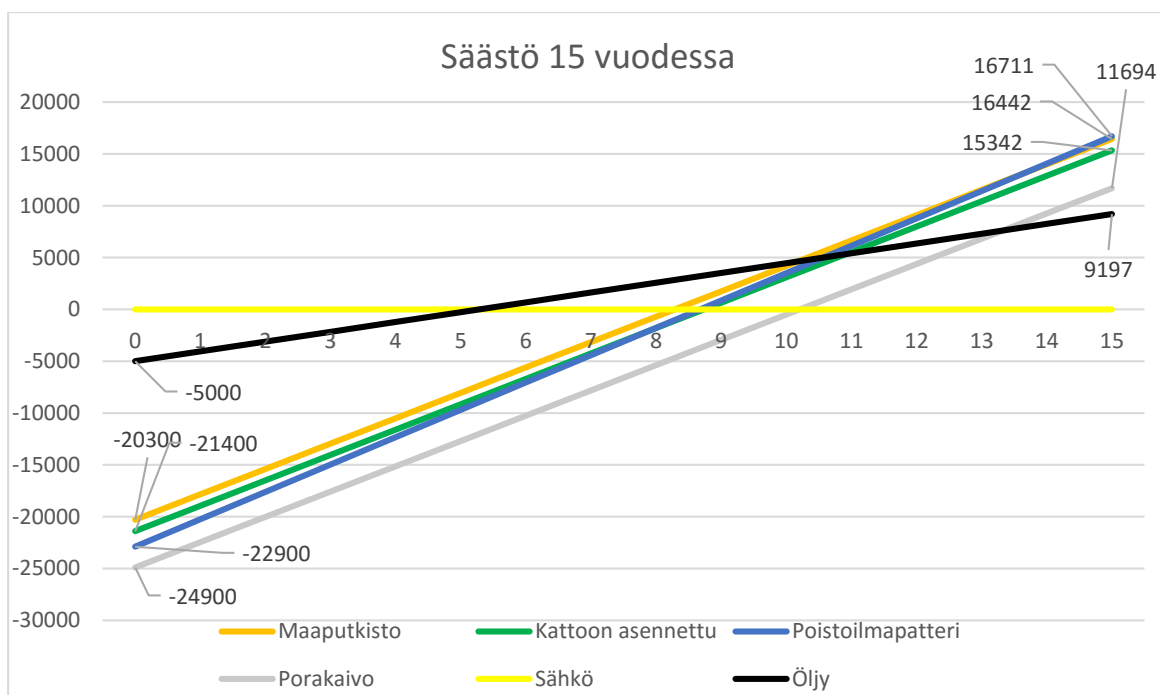
Lämpöpumpun keruupiirien takaisinmaksuajat, kun lämpö tuotetaan suoralla sähkölämmityksellä tai öljyllä on esitetty kuviossa 21. Öljylämmitysratkaisun investointikustannukseksi on kuviossa 21 oletettu 0 euroa.



Kuvio 21. Takaisinmaksuajat keruupiiriratkaisuille

Kuviossa 22 on laskettu säästöä jonka investointi tuottaisi, mikäli lämmitysmuotona olisi sähkölämmitys. Kuviossa 22 öljylämmitysjärjestelmän uusimiskustannukseksi on arvioitu 5000 euroa, joka on realistinen arvio siitä, kuinka paljon lämmitysmuodon nykyaikaistaminen tulisi maksamaan asennuskustannuksineen.





Kuvio 22. Investoinnin säästöarvio 15 vuodessa

Takaisinmaksuaikojen laskennassa ei otettu huomioon energian hintojen nousua tai laskua pitkällä aikavälillä niiden huonon ennustettavuuden takia.

Lämmitysmuotojen vertailuun otettiin sähkö, öljy ja lämpöpumppuratkaisut. Lämmitysmuotojen vuosittaiset energiakustannukset on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Asuinrakennuksen lämmitysmuotojen energiakustannukset vuoden 2015 kustannustason mukaan

Lämmitystapa	Kustannus	
Sähkö	3701	€/a
Öljy	2754	€/a
Poistoilmapatteri	1060	€/a
Maaputkisto	1251	€/a
Porakaivo	1261	€/a
Kattoon asennettu	1251	€/a

## 7 Tulosten pohdinta

Tuloksista voidaan päätellä, että vaikka sähkön- ja öljynhinta ei nousisi merkittävästi seuraavan 10 vuoden aikana, tulisi silti merkittäviä säästöjä investoitaessa lämpöpumppuun. Maalämpöpumppuratkaisuun, jossa keruupiiri asennettaisiin vaakatasoon maaperään, takaisinmaksuajaksi nykyisillä energian hinnoilla muodostuisi noin 8 vuotta. Investoinnin takaisinmaksuaikana 8 vuotta on suhteellisen lyhyt ajateltuna investoinnin elinkaarta, joka nykyaikaisilla maalämpöpumpuilla on noin 15–30 vuotta, ennen kuin laitteisto aiheuttaa suurempia investointi- tai korjauskustannuksia.

Kattoon asennettavan keruupiirin lämmöntuotanto kyky kesäaikaan, jolloin asuinrakennus käyttää lämpöä pääsääntöisesti vain lämpimän käyttöveden valmistukseen, on epävarmaa, koska kesäaikaan karja on laitumella. Lämmöntuotannon varmistamiseksi myös kesäaikaan ja mahdollisesti aikana, jolloin karjaa ei ole, on järkevämpää investoida maalämpöpumppuun, joka keruupiiri on asennettu maaperään vaakata-

pystyasentoon. Lisäksi poistoilmaratkaisun tehokkuuden ja lämmöntuotantovarmuuden lisäarviointi olisi tarpeen ääriolosuhteissa, kuten kovimmilla pakkasilla, jolloin tuotantotilasta saatavan lämpöenergian määrä laskee merkittävästi.

Keruupiirin asentamista maaperään puoltaa myös lypsykarjatalouden kannattavuuden hankala arviointi pitkällä tähtäimellä, mikäli lypsykarjaa ei tulevaisuudessa navetassa ole tai päätetään investoida uuteen navettaan, jää kattoon asennettu keruupiiri tarpeettomaksi.

### **7.1 Tavoitteiden saavuttaminen ja luotettavuus**

Työssä oli tavoitteena selvittää, onko taloudellisesti kannattavaa toteuttaa lämmöntalteenotto uudella tavalla, jossa lämpöpumpun keruupiirin putkisto asennettaisiin navetan kattoon. Tulokseksi saatujen laskelmien mukaan saatavan lämmön määrä jää suhteessa pieneksi, vain 12,7 W/m. Putkiston tulisi näin ollen olla vaadittavan 8 kW:n tehotarpeen kattamiseksi noin 630 m pitkä, mikä lisää putkisto- ja asennuskustannuksia. Tarkastelussa tehokkaimmaksi tavaksi lämmöntalteenottoon havaittiin poistoilmapatteri, joka asennettaisiin jo olemassa olevaan poistoilmakanavaan.

Ympäristön lämmönjohtavuus vaikuttaa merkittävästi siihen, kuinka paljon keruupiiri pystyy pinta-alaansa nähden saamaan lämpöenergiaa ympäristöstä. Toiseksi merkittäväksi tekijäksi muodostuu lämpötilaero, joka yhdessä johtavuuden kanssa muodostuu rajoittavaksi tekijäksi keruupiiriä mitoittaessa. Mikäli johtavuus ja lämpötilaero ovat pieniä, tulisi keruupiirin olla erittäin pitkä. Tämä taas lisää kustannuksia ja viikaantumisriskiä merkittävästi.

Tuloksissa esitetyt takaisinmaksuajat laskettiin tämänhetkisillä markkinahinnoilla energian hintojen voimakkaan vaihtelun vuoksi, mikä vaikeuttaa investoinnin taloudellisuuden arviointia pitkällä aikavälillä. Opinnäytetyö on tehty öljyn hinnan ollessa alimmillaan vuosiin, mikä aiheuttaa vääristymää laskennassa pitkällä ajanjaksolla.

Tulosten luotettavuuteen vaikuttavat oleellisesti laskennassa käytetyt oletukset, kuten ilman liike tuotantotiloissa, sekä pidempiaikaisten mittausten puute, joiden perusteella olisi saatu parempi kuva sisälämpötilojen sekä ilmankosteuden vaihtelusta erivuodenaikoina.

## **7.2 Jatkoselvitykset ja –toimenpiteet**

Opinnäytetyössä saadut tulokset mahdollistivat vaihtoehtoisen lämmönkeruupiirin vertailun muiden valittavana olleiden keruupiiriratkaisujen kanssa. Vaikka vaihtoehtoinen keruupiiriratkaisu osoittautui tehokkuudeltaan heikoksi ja taloudellisesti kannattamattomaksi, ei laskenta ollut silti tarpeeton. Jatkossa laskennassa tehtyjä työkaluja voidaan hyödyntää uusissa tapauksissa, joissa esimerkiksi lämpötilaerot voivat olla merkittävästi suurempia kuin tässä työssä käsitellyssä tapauksessa, ja näin ollen vaihtoehtoiselle ratkaisulle saattaa tulevaisuudessa löytyä käyttöä. Työn tuloksena tehty laskentapohja helpottaa oleellisesti uudelleen laskentaa. Laskentaa helpottavasta taulukosta on kuva liitteessä 4.

Tulosten perusteella lämmöntalteenottoa kattoon asennettavalla keruuputkistolla ei toteuteta heikon kannattavuuden ja huonon hyötysuhteen vuoksi. Kohteeseen tulevaisuudessa mahdollisesti asennetaan maaperään vaakatasoon asennettava keruuputkistolla toteutettu maalämpöpumppuratkaisu.

Lisäselvityskohteiksi valittiin lantaan sitoutuneen hukkalämmön hyödyntämistä. Hukkalämmöntalteenottovaihtoehtoina voisivat olla esimerkiksi lantakourut ja lietelantaaltaat. Työn tulosten perusteella ei hukkalämmöntalteenoton järjestäminen näillä

järjestelmillä ja kyseisessä kohteessa ole taloudellisesti järkevää, vaan kannattaa keruupiirin sijoituskohteeksi valita maahan vaakatasoon sijoitettava keruuputkisto.

Tulevaisuudessa mahdollisesti energian hintojen noustua laskenta tulee suorittaa uudelleen, jotta saadaan luotettava tulos.

## Lähteet

Aittomäki, A. 1992. Kylmäteknikka. Helsinki: Kylmätuki Oy.

Betriebsanleitung operating instructions n.d. Kompressor käyttöohje. Bitzer SE. Viitattu 20.4.2015. <https://www.bitzer.de/documentation/sb-500-2-i.pdf>

Boles, M. & Çengel Y. A. 2011. Thermodynamics: An Engineering Approach. Seventh Edition in SI Units. New York: Mc Graw Hill.

Çengel, Y. A. & Ghajar, A. J. 2011. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. Fourth Edition in SI Units. New York: Mc Graw Hill.

Compact screw compressors n.d. Kompressorikäyttö ohje. Bitzer SE. Viitattu 28.4.2015. <https://www.bitzer.de/documentation/sp-171-2.pdf>

Danfoss lämpöpumput pientaloille 2013. Pumppuluettelo. Danfoss A/S. Viitattu 5.4.2015. <http://kuluttaja.lampo.danfoss.com/PCMPDF/I%C3%A4mp%C3%B6pumppuluettelo%202013.pdf>

Geoenergia-Tutkimushanke n.d. Esite. viitattu 3.9.2015. [http://www.vei.fi/files/pdf/530/Geoenergia\\_esitys.pdf](http://www.vei.fi/files/pdf/530/Geoenergia_esitys.pdf)

Hermetic Compact screw compressors n.d. Kompressorin käyttöohje. Bitzer SE. Viitattu 20.4.2015. <https://www.bitzer.de/documentation/sp-300-5.pdf>

Ilmalämpöpumppu (ILP) n.d. Sulpu ry. Viitattu 5.5.2015. <http://www.sulpu.fi/ilma-lampopumppu>

Juvonen, J. & Lapinlampi, T. 2013. Ympäristöopas 2013. Viitattu 3.4.2015. [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO\\_2013.pdf?sequence=4](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf?sequence=4)

Kaappola, E., Hirvelä, A., Jokela, M. & Kianta, J. 2011. Kylmäteknikan perusteet. Helsinki: Opetushallitus.

Kylmäinfo 2009. Danfoss A/S. Viitattu 5.5.2015. <http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/AF0B95C0-D09E-4815-9274-F7E8E4681E64/0/097096DANFOSSCIMasterF..>

Kylmäsovellusten scroll-kompressorit n.d. Esite. Danfoss A/S. Viitattu 15.4.2015. [http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/D42A573B-D423-42A4-B366-9B9EF12272C8/0/scroll\\_textFIN.pdf%20H%C3%A4mtad%2020.3.2014](http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/D42A573B-D423-42A4-B366-9B9EF12272C8/0/scroll_textFIN.pdf%20H%C3%A4mtad%2020.3.2014)

Käyttöturvallisuutiedote Naturet -17 geosafe 2012. Viitattu 30.9.2015 <http://www.naturet.fi/connect/d43afd94-0838-4d0a-b488->

36ce26d100e0/NATURET+-maal%C3%A4mp%C3%B6neste+-  
17+oC.PDF?MOD=AJPERES

Lämpöpumput 2015. Motiva Oy. Viitattu 15.8.2015. [http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/lampopumput](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/lampopumput)

Maalämpöpumppu 2014. Motiva Oy. Viitattu 2.3.2015. [http://www.motiva.fi/rakentaminen/lammitysjarjestelman\\_valinta/eri\\_lammitysmuodot/maalampopumppu](http://www.motiva.fi/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/eri_lammitysmuodot/maalampopumppu)

MMM-RMO C2.1. n.d. Maatilan lämpöhuolto, asuinrakennusten lämmitys ja ilmanvaihto C2.1. Maa- ja metsätalousministeriön rakennusmääräykset ja -ohjeet. Viitattu 1.4.2015. <http://www.mmm.fi/attachments/maaseutu/rakentaminen/5g7GwWalz/L9-rmoC21-01.pdf>

MMM-RMO C 2.2. n.d. Maatalouden tuotantorakennukset lämpöhuolto ja huoneilmasto C2.2. Maa- ja metsätalousministeriön rakennusmääräykset ja -ohjeet. Viitattu 11.4.2015. <http://www.mmm.fi/attachments/maaseutujarakentaminen/5iiBVU-yGW/L10-rmoC22-01.pdf>

Neljä lämmönlähdettä n.d. Thermia Oy. Viitattu 29.4.2015. <http://www.thermia.fi/lampopumppu/Nelja-eri-lammonlahdetta.asp>

Neste 2015. Polttoöljyntilaus. Viitattu 17.9.2015. [https://www.neste.fi/temperatilaus\\_yksityis.aspx?path=2589%3b2655%3b2710%3b2791%3b2800%3b3695&cktest=true](https://www.neste.fi/temperatilaus_yksityis.aspx?path=2589%3b2655%3b2710%3b2791%3b2800%3b3695&cktest=true)

Performer scroll compressors n.d. Danfoss A/S. Viitattu 18.4.2015. [http://www.actrol.com.au//Global/Assets/Howto/257-Maneurop-SM\\_SZ\\_SY-Selection-and-Application-Guide.pdf](http://www.actrol.com.au//Global/Assets/Howto/257-Maneurop-SM_SZ_SY-Selection-and-Application-Guide.pdf)

Perälä, O. & Perälä, R. 2013. Lämpöpumput, Suomalainen käsikirja aikamme lämmitysjärjestelmästä. 3. uud. p. Helsinki: Alfamer/Karisto Oy.

Poistoilmalämpöpumppu (PILP) n.d. Sulpu ry, Viitattu 5.5.2015. <http://www.sulpu.fi/poistoilmalampopumppu>

Reciprocating compressors n.d. Bitzer SE. Viitattu 21.5.2015. <https://www.bitzer.de/documentation/kp-104-3.pdf>

Roponen, O. 2015. Toimitusjohtaja. Kurkelan Putkityö Oy. Haastattelu 14.5.2015.

Savon Voima 2015. N.d. Savon Voima Oy. Viitattu 18.9.2015. [http://www.savonvoima.fi/SiteCollectionDocuments/Verkko/Sahkonsiirtohinnot\\_01012015.pdf](http://www.savonvoima.fi/SiteCollectionDocuments/Verkko/Sahkonsiirtohinnot_01012015.pdf)

Seuna S. 2011. Motiva Oy. Helsinki. Viitattu 28.9.2015. [http://energia.fi/sites/default/files/dokumentit/ajankohtaista/Tapahtumat/2012/lu\\_seuna\\_lampopumppu-finlandia-taloenergiateollisuusfinal14122011.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/dokumentit/ajankohtaista/Tapahtumat/2012/lu_seuna_lampopumppu-finlandia-taloenergiateollisuusfinal14122011.pdf)

Valtanen, E. 2010. Tekniikan taulukkokirja. 18.p. Mikkeli: Genesiskirjat Oy.



## Liitteet

### Liite1. Muoviputken laskenta sähköverkkoanalogia

<i>Muoviputki</i>			
$D := 0.04$	$L_2 := 1$	$L := 0.0037$	$D_2 := 0.0326$
$h_2 := 3487$			
$A := \pi \cdot D \cdot L_2$	$A = 0.126$	$A_2 := \pi \cdot D_2 \cdot L_2$	$A_2 = 0.102$
$k := 0.32$			
$h := 15.18$			
$T_1 := 12$			$R_{2cond} := \frac{L}{(k \cdot A)} = 0.092$
$T_2 := 4$			
$R_{1conv} := \frac{1}{(h \cdot A)} = 0.524$			
$R_{2cond} := \frac{\ln\left(\frac{D}{D_2}\right)}{(k \cdot 2 \cdot \pi \cdot L_2)} = 0.102$			
$R_{3conv} := \frac{1}{(h_2 \cdot A_2)} = 0.003$			
$R_{total} := R_{1conv} + R_{2cond} + R_{3conv} = 0.629$			
$Q := \left( \frac{T_1 - T_2}{R_{total}} \right) = 12.723$			

## Liite 2. Kupariputken laskenta sähköverkkoanalogia

*kupariputki*

$$D := 0.04 \quad L_2 := 1 \quad L := 0.001 \quad D_2 := 0.039$$

$$h_2 := 3487$$

$$A := \pi \cdot D \cdot L_2 \quad A = 0.126 \quad A_2 := \pi \cdot D_2 \cdot L_2 \quad A_2 = 0.123$$

$$k := 401$$

$$h := 15.18$$

$$T_1 := 12$$

$$T_2 := 4$$

$$R_{1conv} := \frac{1}{(h \cdot A)} = 0.524$$

$$R_{2cond} := \frac{\ln\left(\frac{D}{D_2}\right)}{(k \cdot 2 \cdot \pi \cdot L_2)} = 1.005 \cdot 10^{-5}$$

$$R_{3conv} := \frac{1}{(h_2 \cdot A_2)} = 0.002$$

$$R_{total} := R_{1conv} + R_{2cond} + R_{3conv} = 0.527$$

$$Q := \left( \frac{T_1 - T_2}{R_{total}} \right) = 15.192$$

**Liite 3. Laskentapohja**

Laskentapohja					
Keruupiirin tiedot					
Putki	PEM Muoviputki 40.3.7 PN10				
seinämäpaksuus	3,7	mm	Olosuhteet		
Ulkohalkaisija	40	mm			
Lämmönjohtavuus	0,32	W/m.c	Ilman nopeus	1	m/s
Putkenpituus	1	m	Ilman lämpötila	12	C
Naturet -17	28 %		Tulokset		
Vesi	72 %		Keruupiirin pinta-ala	0,125664	m2
Massavirta	1,536	kg/s	Ilmasta putken ulkopinnalle		
Keskimääräinen lämpötilaero	7,830461	C	$h=Nu*(k/D)$	15,18919	W/m2*K
			$Q_{conv}=h*A(T_s-T_{\infty})$	3,817456	W
			putken sisäpinnasta nesteeseen		
			$h=(k*Nu)/D$	3487,505	W/m2*K
			$Q_{conv}=m*C_p*(T_e-T_i)$	22680,21	W